

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Comparação Experimental das Características de  
Funcionamento de um Motor de Ímanes Permanentes  
com Condições de Alimentação Diversas**

**Ruben Daniel Silva Tavares**

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major de Energia

Orientador: Prof. Dr. Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa

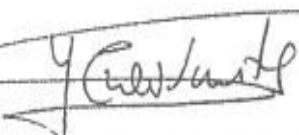
Abril de 2014



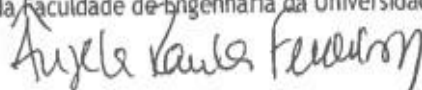
A Dissertação intitulada

“Comparação Experimental das Características de Funcionamento de um Motor  
de Ímanes Permanentes com Condições de Alimentação Diversas”

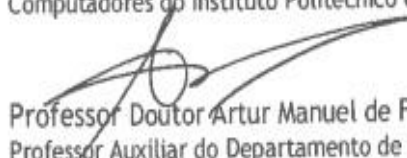
foi aprovada em provas realizadas em 16-04-2014

o júri 

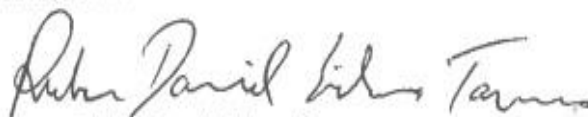
Presidente Professor Doutor José Eduardo Roque Neves dos Santos  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professora Doutora Ângela Paula Barbosa da Silva Ferreira  
Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores do Instituto Politécnico de Bragança

  
Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua  
exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente  
autorizado. Os resultados, idelas, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou  
inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas  
usadas, são corretamente citados.



Autor - Rúben Daniel Silva Tavares

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# Resumo

A crescente preocupação com a utilização racional da energia tem desafiado os fabricantes de motores elétricos a conceberem máquinas cada vez mais eficientes, mantendo elevados níveis de robustez, fiabilidade e flexibilidade, a um baixo preço.

Neste contexto, a utilização de máquinas síncronas de ímanes permanentes como motor pode revelar-se uma solução interessante, devido ao elevado rendimento e elevado fator de potência que as caracteriza.

O principal objetivo deste trabalho passa por desenvolver investigação experimental sobre um motor síncrono de ímanes permanentes de alto rendimento, a fim de obter e comparar as principais características de funcionamento quando submetido a diferentes condições de alimentação.

O estudo começa por abordar a evolução dos ímanes permanentes, distinguindo as suas classes e propriedades. Diferentes tipos de máquinas que empregam ímanes permanentes são diferenciados, dando-se especial atenção à máquina síncrona de ímanes permanentes e à sua aplicação como motor.

Finalmente, são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados no Laboratório de Máquinas Eléctricas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

**Palavras-Chave:** Motores Elétricos de Elevada Eficiência, Motor Síncrono de Ímanes Permanentes, Ímanes Permanentes.



# Abstract

The growing concern about the rational use of energy has challenged the electrical motors manufacturers to design more efficient machines, maintaining high levels of robustness, reliability and flexibility at a low price.

In this context, the use of permanent magnet synchronous machines as motor can prove itself to be an interesting solution, due to high efficiency and high power factor that characterizes them.

The main objective of this work is to develop an experimental investigation of a permanent magnet synchronous motor for high performance, in order to obtain and compare the main operation's characteristics when subjected to different feeding conditions.

The study begins by addressing the evolution of permanent magnets, distinguishing their classes and properties. Different types of machines that employ permanent magnets are revealed, giving special attention to the permanent magnet synchronous machine and its implementation as a motor.

Finally, the results obtained from tests carried out in the Electrical Machines Laboratory of the Faculty of Engineering of Porto University are presented.

**Keywords:** High Efficiency Electric Motors, Permanent Magnet Synchronous Motors, Permanent Magnets.





# Agradecimentos

Ao Prof. Doutor Artur Costa, pelo forte contributo prestado durante a realização deste trabalho. Pela sua simpatia, rigor e empenho demonstrados face aos obstáculos que surgiram.

Ao Eng. Pinheiro Jorge, pela sua simpatia e total disponibilidade durante os testes realizados no Laboratório de Máquinas Elétricas da FEUP.

À minha família. Em especial à minha Mãe, Maria Luísa Tavares, por tudo o que ela significa para mim.

Aos meus amigos, pelo companheirismo prestado durante as longas horas de estudo que este trabalho envolveu. Em especial, Daniel Ribeiro, Mafalda Gomes, Sónia Soares e Tiago Pais.



# Índice

Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos .....	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras .....	xiii
Lista de tabelas .....	xvii
Abreviaturas e Símbolos .....	xviii
Capítulo 1 .....	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento .....	1
1.2 - Objetivos .....	2
1.3 - Estrutura da dissertação.....	2
Capítulo 2 .....	5
Ímanes Permanentes nas Máquinas Elétricas .....	5
2.1 - Evolução Histórica .....	5
2.2 - Propriedades.....	7
2.3 - Classes de Ímanes Permanentes.....	12
2.4 - Magnetismo Permanente vs Excitação Eletromagnética .....	17
2.5 - Máquinas de Ímanes Permanentes .....	18
2.6 - Aplicações das Máquinas de Ímanes Permanentes .....	24
2.7 - Síntese .....	28
Capítulo 3 .....	29
Motor Síncrono de Ímanes Permanentes .....	29
3.1 - Introdução.....	29
3.2 - Aspectos Construtivos .....	31
3.3 - Princípio de Funcionamento .....	40
3.4 - Características de Funcionamento.....	45
3.5 - Arranque de Motores Síncronos de Ímanes Permanentes .....	48
3.6 - Análise Comparativa com outros Motores Elétricos.....	52
3.7 - Imposição no mercado: MSIP vs Motor de Relutância .....	59
3.8 - Síntese .....	60

<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>61</b>
Investigação Experimental .....	61
4. 1 - Introdução.....	61
4. 2 - Caracterização Laboratorial .....	62
4. 3 - Procedimento Experimental .....	68
4. 4 - Fontes de Alimentação.....	81
4. 5 - Ensaios Laboratoriais.....	86
4. 6 - Análise comparativa.....	99
4. 7 - Síntese .....	106
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>107</b>
Conclusão .....	107
5.1 - Síntese e conclusões .....	107
5.2 - Perspetivas de trabalhos futuros.....	108
<b>Referências .....</b>	<b>109</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>113</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>115</b>
<b>Anexo A.....</b>	<b>116</b>
<b>Anexo B .....</b>	<b>117</b>

## Lista de figuras

Figura 2.1 - Ciclo de histerese de um material ferromagnético [2].....	8
Figura 2.2 - Curva de desmagnetização B - H ‘normal’ e curva de desmagnetização Bi - H ‘intrínseca’ para diferentes temperaturas de um íman permanente de NdFeB [1] .....	10
Figura 2.3 - Curvas de desmagnetização para diferentes materiais magnéticos permanentes [1].....	12
Figura 2.4 - Evolução do preço do neodímio entre 2006 e 2013 [12] .....	14
Figura 2.5 - Corte longitudinal de uma máquina C.C. de ímanes permanentes com escovas [1] .....	20
Figura 2.6- Constituição dum motor C.C. de ímanes permanentes com escovas: (a) Estator (b) Rotor [1].....	20
Figura 2.7 - Constituição de um motor C.C. de ímanes permanentes sem escovas [4].....	21
Figura 2.8 - Comparação entre um motor C.C. de ímanes permanentes sem e com escovas [1].....	22
Figura 2.9 - Máquina Síncrona de Ímanes Permanentes [5].....	23
Figura 2.10 - Chave de fendas elétrica sem fios equipada com motor CC com escovas [1] ...	25
Figura 2.11 - Disco rígido equipado com um motor CC do tipo <i>brushless</i> [1] .....	26
Figura 2.12 - Sistema de bombeamento de água [1] .....	27
Figura 2.13 - Aerogerador equipado com um gerador síncrono de ímanes permanentes [46] .....	27
Figura 3.1- Rotor de uma máquina síncrona convencional equipado com anéis [19] .....	31
Figura 3.2 - Estrutura de um motor síncrono de ímanes permanentes de fluxo radial [25] ...	32
Figura 3.3 - Forma anelar das chapas estatóricas.....	33
Figura 3.4 - Estator de um motor síncrono de ímanes permanentes: (a) execução dos enrolamentos; (b) núcleo com enrolamento completo [25] .....	34
Figura 3.5 - Configuração rotórica com ímanes dispostos periféricamente [26] .....	36

<b>Figura 3.6</b> - Configuração rotórica com ímanes dispostos periféricamente entre saliências [26] .....	36
<b>Figura 3.7</b> - Configuração rotórica com ímanes dispostos interiormente - camada simples [26] .....	37
<b>Figura 3.8</b> - Configuração rotórica com ímanes dispostos interiormente - múltiplas camadas [26] .....	38
<b>Figura 3.9</b> - Configuração rotórica com ímanes dispostos interiormente - camada simples com gaiola [26] .....	38
<b>Figura 3.10</b> - Evolução da estrutura rotórica [31,33] .....	40
<b>Figura 3.11</b> - Diagrama fasorial magnético do motor síncrono trifásico .....	42
<b>Figura 3.12</b> - Ângulo de binário .....	42
<b>Figura 3.13</b> - Diagrama fasorial elétrico do motor síncrono trifásico .....	43
<b>Figura 3.14</b> - Eixo longitudinal e transversal no rotor .....	44
<b>Figura 3.15</b> - Evolução das componentes de binário de uma máquina de ímanes permanentes com anisotropia inversa [14] .....	47
<b>Figura 3.16</b> - Influência da razão de anisotropia no binário eletromagnético desenvolvido por uma máquina síncrona de ímanes permanentes [14] .....	47
<b>Figura 3.17</b> - Características de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes [1] .....	48
<b>Figura 3.18</b> - Característica mecânica de binário durante o arranque - $T=f(s)$ [29] .....	49
<b>Figura 3.19</b> - Comparação do fator de potência [29] .....	54
<b>Figura 3.20</b> - Comparação do rendimento [29] .....	55
<b>Figura 3.21</b> - Comparação da corrente do induzido [29] .....	56
<b>Figura 3.22</b> - Motor síncrono de relutância; Fonte: ABB .....	56
<b>Figura 3.23</b> - Motor síncrono convencional; Fonte: WEG .....	58
<b>Figura 4.1</b> - Motor síncrono de ímanes permanentes - modelo <i>WQuattro</i> ; Fonte: WEG .....	63
<b>Figura 4.2</b> - Índices de Eficiência - IEC 60034-31 ( $p=2$ - $f=50\text{Hz}$ ); Fonte: ABB [39] .....	64
<b>Figura 4.3</b> - Banca de Ensaios .....	65
<b>Figura 4.4</b> - Ciclo de Energia .....	66
<b>Figura 4.5</b> - Aparelhos de medida .....	67
<b>Figura 4.6</b> - Fluxo de potência da MSIP .....	70
<b>Figura 4.7</b> - Localização de um ponto quente na carcaça do motor e respetiva sonda de temperatura .....	73
<b>Figura 4.8</b> - Representação gráfica de 2 pontos de temperatura em função da carga .....	75

<b>Figura 4.9</b> - Representação dos pontos previstos para os restantes regimes de carga .....	76
<b>Figura 4.10</b> - Fluxograma do procedimento referente ao Método A da norma IEEE 112 .....	81
<b>Figura 4.11</b> - Onda da tensão de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 400V/50Hz.....	83
<b>Figura 4.12</b> - Onda da corrente de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 400V/50Hz.....	83
<b>Figura 4.13</b> - Grupo gerador e respetiva chapa de características.....	84
<b>Figura 4.14</b> - Onda da tensão de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 460V/60Hz.....	84
<b>Figura 4.15</b> - Onda da corrente de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 460V/60Hz.....	85
<b>Figura 4.16</b> - Onda da tensão de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 400V/50Hz(VEV) .....	85
<b>Figura 4.17</b> - Onda da corrente de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 400V/50Hz(VEV) .....	86
<b>Figura 4.18</b> - Esquema elétrico do motor alimentado diretamente da rede - 400V/50Hz .....	87
<b>Figura 4.19</b> - Evolução da corrente absorvida em função da carga - 400V/50Hz.....	90
<b>Figura 4.20</b> - Evolução das potências P e Q em função da carga - 400V/50Hz.....	90
<b>Figura 4.21</b> - Evolução da potência reativa em função da carga - 400V/50Hz.....	91
<b>Figura 4.22</b> - Evolução do fator de potência em função da carga - 400V/50Hz .....	92
<b>Figura 4.23</b> - Evolução das potências mecânica e elétrica em função da carga - 400V/50Hz.....	92
<b>Figura 4.24</b> - Evolução das perdas em função da carga - 400V/50Hz.....	93
<b>Figura 4.25</b> - Evolução do rendimento em função da carga - 400V/50Hz.....	93
<b>Figura 4.26</b> - Esquema elétrico do motor alimentado por um gerador síncrono - 460V/60Hz.....	94
<b>Figura 4.27</b> - Esquema elétrico do motor alimentado através de um VEV - 400V/50Hz.....	97
<b>Figura 4.28</b> - Comparação das curvas características da corrente em função da carga.....	99
<b>Figura 4.29</b> - Comparação das curvas características do fator de potência em função da carga.....	100
<b>Figura 4.30</b> - Comparação das curvas características do fator de potência em função da carga.....	101
<b>Figura 4.31</b> - Comparação das curvas características da potência reativa em função da carga.....	101
<b>Figura 4.32</b> - Comparação das curvas características do rendimento em função da carga...	102

<b>Figura 4.33</b> - Comparação das curvas características do rendimento em função da carga...	102
<b>Figura 4.34</b> - Comparação das curvas características das perdas totais em função da carga	103
<b>Figura 4.35</b> - Comparação das curvas características das perdas Joule em função da carga	104
<b>Figura 4.36</b> - Comparação das curvas características das perdas não Joule em função da carga .....	104
<b>Figura 4.37</b> - Comparação das curvas características das potências elétrica e mecânica em função da carga.....	105
<b>Figura A.1</b> - Folha de características do motor <i>WQuattro</i> .....	116



# Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades magnéticas de alguns ímanes permanentes [8,9,10,11].....	16
Tabela 2.2 - Classificação dos ímanes de NdFeB em função da temperatura de op. máxima [11].....	17
Tabela 2.3 - Designações das máquinas de ímanes permanentes de acordo com as direções do fluxo no entreferro e no núcleo do estator [15].....	24
Tabela 4.1 - Ensaio realizado no Laboratório de Máquinas Elétricas .....	63
Tabela 4.2 - Chapa de Características do Motor <i>WQuattro</i> .....	64
Tabela 4.3 - Precisão dos aparelhos de medida(em %), segundo as normas.....	68
Tabela 4.4 - Temperatura específica segundo as diferentes classes de isolamento; Fonte: IEEE 112.....	73
Tabela 4.5 - Valores de temperatura/resistência dos enrolamentos do estator - 400V/50Hz.....	88
Tabela 4.6 - Valores das grandezas medidas no ensaio em carga - 400V/50Hz.....	89
Tabela 4.7 - Valores das grandezas calculadas no ensaio em carga - 400V/50Hz .....	89
Tabela 4.8 - Valores de temperatura/resistência dos enrolamentos do estator - 460V/60Hz.....	95
Tabela 4.9 - Valores das grandezas medidas no ensaio em carga - 460V/60Hz.....	96
Tabela 4.10 - Valores das grandezas calculadas no ensaio em carga - 460V/60Hz.....	96
Tabela 4.11 - Valores de temperatura/resistência dos enrolamentos do estator - 400V/50Hz (VEV) .....	98
Tabela 4.12 - Valores das grandezas medidas no ensaio em carga - 400V/50Hz (VEV).....	98
Tabela 4.13 - Valores das grandezas calculadas no ensaio em carga - 400V/50Hz (VEV) .....	99
Tabela B.1 - Dados do ensaio em carga do motor <i>WQuattro</i> , obtidos pela WEG .....	117

# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

AlNiCo	Alumínio-Níquel-Cobalto
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
EUA	Estados Unidos da América
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
fem	Força Eletromotriz
fmm	Força Magnetomotriz
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IM	<i>Induction Motor</i>
LME	Laboratório de Máquinas Elétricas
LSPM	<i>Line Start Permanent Magnet</i>
MSIP	Motor Síncrono de Ímanes Permanentes
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
rpm	Rotações por minuto
PM	<i>Permanent Magnet</i>
pu	Por unidade
SI	Sistema Internacional
SmCo	Samário-Cobalto
USD	<i>United States Dollar</i>
VEV	Variador Eletrónico de Velocidade

## Lista de símbolos

B	Indução magnética
B <sub>r</sub>	Indução remanescente ou remanente ou remanescência

$B_s$	Indução de saturação
$(BH)_{\text{máx}}$	Produto energético máximo de um íman permanente
$\cos\varphi$	Fator de potência
$E_0$	Força eletromotriz em vazio
$f$	Frequência
$H$	Excitação magnética
$H_c$	Intensidade do campo coercivo ou coercividade
$H_{\text{indutor}}$	Campo magnético indutor
$H_{\text{induzido}}$	Campo magnético de reação do induzido
$I_{\text{abs}}$	Corrente absorvida por fase
$I_d$	Componente longitudinal da corrente estatórica
$I_q$	Componente transversal da corrente estatórica
$n$	Velocidade de rotação
$n_s$	Velocidade de sincronismo
$p$	número de pares de pólos
$P_{\text{abs}}$	Potência absorvida
$P_{\text{abs}_c}$	Potência absorvida corrigida
$p_{\text{joule}}$	Perdas no cobre
$p_{n\_joule}$	Perdas não Joule
$P_{\text{mec}}$	Potência mecânica
$Q$	Potência reativa absorvida
$r$	razão de anisotropia
$R_{\text{amb\_inicial}}$	Resistência média do estator, por fase, à temperatura ambiente inicial
$R_{\text{corrigida}}$	Resistência corrigida para a temperatura específica de funcionamento
$R_{\text{medida}}$	Resistência medida após o ensaio de temperatura
$R_s$	Resistência do induzido
$T_{\text{arr}}$	Binário de arranque
$T_{\text{ass}}$	Binário assíncrono
$T_c$	Temperatura de Curie de um íman permanente
$T_e$	Binário eletromagnético
$T_{\text{exc}}$	Binário de excitação
$T_f$	Binário de frenagem
$T_R$	Binário resistente
$T_{\text{rel}}$	Binário de relutância
$T_s$	Temperatura de serviço de um íman permanente
$U$	Tensão elétrica aos terminais do motor
$X_d$	Reatância síncrona longitudinal
$X_q$	Reatância síncrona transversal
$X_s$	Reatância síncrona
$\lambda$	Ângulo de binário

$\delta$	Ângulo de carga
$\eta$	Rendimento
$\Theta_{amb\_final}$	Temperatura ambiente no fim do ensaio em carga
$\Theta_{amb\_inicial}$	Temperatura ambiente inicial
$\Theta_{amb\_ref}$	Temperatura ambiente de referência, que corresponde a 25°C
$\Theta_{medida}$	Temperatura dos enrolamentos medida após o teste de temperatura
$\Theta_{corrigida}$	Temperatura específica de funcionamento

# Capítulo 1

## Introdução

A política energética atual direciona-se fortemente para o lado da utilização racional da energia elétrica. Isto significa que elevados padrões de eficiência energética devem ser seguidos em todas as áreas que compõe o Sistema Elétrico de Energia.

Estima-se que o consumo elétrico por parte de motores elétricos, realizado maioritariamente no setor industrial, ultrapasse os 40% do consumo atual de energia elétrica em todo o mundo.

### 1.1 - Enquadramento

De forma a melhorar a utilização racional da energia, iniciativas para aumentar a eficiência dos acionamentos elétricos, através de motores elétricos de alto rendimento, são significativas quando se considera a sua representatividade no panorama global do consumo de energia elétrica.

Neste sentido, conjuntamente com a descoberta de novos materiais magnéticos permanentes de elevado produto energético na década de 80, mais concretamente os ímanes de neodímio-ferro-boro (NdFeB), os fabricantes de máquinas elétricas voltaram a despertar o interesse pelo desenvolvimento de máquinas de ímanes permanentes. Estas máquinas destacam-se, principalmente, pelo elevado rendimento e elevado fator de potência que oferecem, tornando a sua exploração economicamente viável e compensando, assim, o investimento inicial que, através da vulgarização dos materiais magnéticos permanentes, tende a diminuir.

A máquina síncrona de ímanes permanentes começa a impor-se como um forte concorrente face à supremacia adquirida tanto pela máquina síncrona convencional como pela máquina assíncrona, pelo que o seu conhecimento profundo, tanto ao nível teórico como

ao nível experimental, se torna fundamental no sentido de se atingir padrões de qualidade cada vez mais elevados.

### 1.2 - Objetivos

Este trabalho tem como objetivo fundamental:

- desenvolver um trabalho de investigação experimental com vista à obtenção e comparação das características de funcionamento estacionário de um motor síncrono de ímanes permanentes quando funciona com condições diversas de alimentação, nomeadamente a 400V/50Hz e 460V/60Hz, e através de um variador eletrónico de velocidade (VEV).

Associado a este objetivo, pretende-se ainda:

- fazer um estudo global dos materiais magnéticos permanentes e sua aplicação nas máquinas elétricas;
- estudar o motor síncrono de ímanes permanentes e compará-lo com outras soluções existentes para acionamento eletromecânico.

### 1.3 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada tendo como base os objetivos descritos anteriormente. Inicialmente será efetuado um estudo teórico profundo do tema em questão seguido de uma forte componente experimental, onde serão realizados testes tendo como objetivo obter as características de funcionamento e tirar conclusões quanto ao comportamento da máquina síncrona de ímanes permanentes quando submetida a condições diversas de alimentação.

Assim, no capítulo 1, faz-se uma introdução ao tema, identificando os principais objetivos e desafios deste estudo. A estruturação da dissertação é, também, apresentada.

No capítulo 2, é efetuado um estudo da evolução dos ímanes permanentes utilizados nas máquinas elétricas, das suas principais classes e respetivas propriedades. São identificadas, ainda, as diferentes variantes construtivas das máquinas de ímanes permanentes assim como as suas principais aplicações.

No capítulo 3, é feito um estudo aprofundado do motor síncrono de ímanes permanentes. São evidenciados os seus aspetos construtivos, o seu princípio de funcionamento e as suas características de funcionamento. A problemática do arranque é também estudada. Por fim,

é feita uma análise comparativa deste motor com outras alternativas existentes no mercado, tentando perceber qual a solução tecnológica que se enquadra melhor para se impor no mercado a médio/longo prazo.

O 4º capítulo é caracterizado por uma forte componente experimental. É feita a caracterização do material utilizado, tanto das fontes e das máquinas elétricas, como de toda a aparelhagem de medida. São analisados os dados obtidos através de ensaios em regime de carga com diferentes condições de alimentação, nomeadamente a 400V/50Hz e 460V/60Hz e com variador eletrónico de velocidade.

Por último, no 5º capítulo, apresentam-se as principais conclusões deste trabalho de pesquisa e indicam-se algumas perspetivas para a sua continuidade futura.





## Capítulo 2

# Ímanes Permanentes nas Máquinas Eléctricas

Neste capítulo, descreve-se a evolução histórica dos materiais magnéticos permanentes, as suas principais propriedades magnéticas e as principais classes destes materiais que são aplicadas na construção das máquinas eléctricas.

De seguida, faz-se uma breve análise comparativa da excitação através de ímanes permanentes e da excitação eletromagnética, assim como, a enumeração das vantagens e desvantagens de ambos os métodos de excitação supracitados.

Por fim, são apresentados os principais tipos de máquinas rotativas que fazem uso dos ímanes permanentes e os principais campos de aplicação das mesmas.

### 2.1 - Evolução Histórica

As observações de fenómenos magnéticos naturais remontam ao tempo da Grécia Antiga. Os gregos daquela época observaram que certos minerais de ferro, como a magnetite, apresentavam a propriedade de atrair pequenos pedaços de ferro. Essas substâncias não eram mais do que óxidos de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). No estado natural, apresentam esta propriedade o ferro, o cobalto, o magnésio e muitos compostos destes metais. A esta propriedade de atração deu-se o nome de magnetismo. O nome deriva da antiga cidade da Ásia Menor, Magnésia, onde, segundo a tradição, foi observada pela primeira vez este fenómeno [7].

No início do século XVII, William Gilbert publicou estudos científicos que tentavam explicar algumas das propriedades básicas do magnetismo, tendo mesmo referido técnicas de fabrico de materiais com melhores propriedades magnéticas do que aquelas observadas nos ímanes naturais [3].

Mais tarde, após várias experiências laboratoriais que culminaram na conceção do primeiro electroímã em 1825, surgem enormes avanços científicos na área do eletromagnetismo como a descoberta da indução eletromagnética, por parte de Joseph Henry e Michael Faraday. Grande parte destas descobertas serviu de base para os trabalhos de engenharia desenvolvidos no fim do século XIX, tornando possível a eletrificação das sociedades industrializadas.

Consequentemente, com o crescente interesse pela utilidade dos materiais magnéticos, começaram a ser desenvolvidas várias ligas que apresentavam propriedades magnéticas muito interessantes. Em 1857, várias experiências realizadas por Madame Curie culminaram na descoberta de um material magnético com coercividade de 7 kA/m. Mais tarde, em 1917, os japoneses Honda e Takagi, demonstraram que ligas de aço contendo 30% a 40% de cobalto apresentavam uma coercividade de 20 kA/m assim como um produto energético máximo de  $8\text{kJ/m}^3$ . Contudo, devido ao elevado preço do cobalto, assim como do processo de fabrico destas ligas, o seu preço final era bastante elevado. Atendendo, ainda, que estas ligas se desmagnetizavam facilmente e que a necessidade de dar resposta a uma crescente utilização dos materiais magnéticos era cada vez maior, surgiu uma autêntica corrida pelo desenvolvimento de novos materiais magnéticos [3].

Entretanto, em 1931, dá-se uma revolução na indústria dos materiais magnéticos permanentes com o surgimento dos Alnicos. Estes eram constituídos por alumínio, níquel, cobalto e ferro [4]. A primeira liga deste material não continha cobalto, era constituída por alumínio (10%), níquel (25%) e ferro (65%). Era mais barata e apresentava uma coercividade superior quando comparada com as ligas de aço-cobalto. Com o objetivo de aumentar o produto energético máximo destes materiais, vários fabricantes testaram novos métodos de fabrico, chegando à conclusão de que a adição de cobalto a estas ligas de Al-Ni-Fe melhorava substancialmente as suas propriedades magnéticas. Para além de um aumento do magnetismo remanescente, um aumento do valor do campo coercivo também era conseguido, fazendo com que estas ligas não se desmagnetisassem tão facilmente quando submetidas a campos magnéticos externos. De facto, os fabricantes tinham conseguido criar ímanes permanentes com ótimas propriedades magnéticas mas que apresentavam duas grandes desvantagens, tornando o seu preço final bastante elevado. A primeira prendia-se com o seu processo de fabrico, que era bastante complexo e dispendioso, e a segunda estava relacionada com o elevado preço do cobalto. Isto fez com que o seu domínio no mercado global fosse alterado com o aparecimento dos materiais magnéticos cerâmicos, vulgarmente conhecidos por ferrites.

As ferrites foram desenvolvidas pela empresa Philips na década de 1940, ficando disponíveis comercialmente na década seguinte. Estes materiais apresentavam uma coercividade superior à dos Alnicos mas o mesmo não se sucedia com a sua remanescência.

Outra desvantagem estava relacionada com sua baixa temperatura de Curie, o que significava que as suas propriedades magnéticas eram severamente afetadas quando estes ímanes ficavam sujeitos a elevadas temperaturas de trabalho. Contudo, o seu preço face aos Alnicos apresentava-se como uma enorme vantagem. Eram os materiais presentes no mercado com o preço por unidade de produto energético mais baixo. Atualmente, as ferrites representam cerca de 50% do mercado dos ímanes permanentes em termos financeiros. São ainda muito utilizadas nas mais diversas aplicações, pois combinam um preço relativamente baixo com um produto energético máximo razoável [3].

Na década de 60, surge uma terceira família de materiais magnéticos permanentes baseada em terras raras, como o samário e o neodímio. Inicialmente, produziram-se ímanes permanentes de samário-cobalto ( $\text{SmCo}_5$ ) que rapidamente foram utilizados em aplicações aeroespaciais e militares devido ao seu elevado produto energético máximo por unidade de volume, comparativamente com os Alnicos e as ferrites.

Em 1983, a General Motors e a Sumitomo Special Metals desenvolveram os primeiros ímanes permanentes de neodímio-ferro-boro ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ). Estes dois fabricantes utilizaram técnicas de fabrico diferentes tendo sido aquela desenvolvida pelo primeiro a que teve maior aceitação comercial [3]. Comparativamente, os ímanes de NdFeB são os que apresentam maior produto energético máximo, pois para além de uma elevada coercividade são caracterizados por uma elevada indução remanescente. Têm como principal desvantagem a sua baixa temperatura de Curie, o que limita a utilização destes ímanes em aplicações que exijam elevadas temperaturas de funcionamento.

## 2.2 - Propriedades

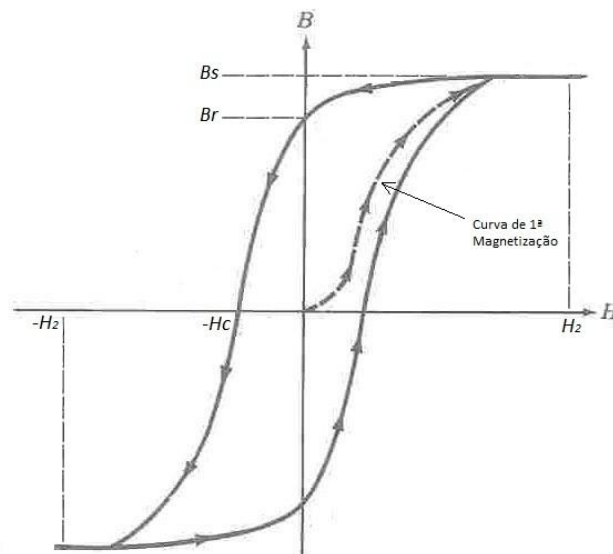
Os ímanes permanentes são materiais magnéticos duros caracterizados por conservarem grande parte da energia magnética após a influência de um campo magnetizante externo. As suas propriedades influenciam significativamente a configuração de uma máquina de ímanes permanentes pelo que o seu conhecimento se torna crucial aquando do projeto de uma máquina deste tipo.

### 2.2.1 - Ciclo de Histerese

A indução magnética  $\vec{B}$  de um material depende da sua permeabilidade magnética  $\mu$  e do campo de excitação magnética  $\vec{H}$  que lhe é aplicado. A indução  $\vec{B}$  é dada pela seguinte expressão:

$$\vec{B} = \mu \times \vec{H} \quad (2.1)$$

A relação entre a indução  $B$  e o campo  $H$  pode ser visualizada na figura 2.1, a seguir demonstrada.



**Figura 2.1** - Ciclo de histerese de um material ferromagnético [2]

Ao analisar o gráfico da figura anterior, verifica-se que, na curva de magnetização (1º quadrante), à medida que a excitação magnética  $H$  aumenta, a indução  $B$  também aumenta até atingir a indução de saturação  $B_s$ . Em termos físicos, significa que todos os momentos magnéticos estão orientados no mesmo sentido, sendo este o valor máximo de magnetização que o material permite obter [2]. Se, em seguida, se diminuir o campo aplicado até zero, pode-se concluir que o material mantém um campo magnético residual ou remanescente,  $B_r$ , e que, para o anular, é necessário aplicar um campo inverso de valor  $H_c$ , designado de campo coercivo.

É de notar que, quando a excitação  $H$  diminui, os valores tomados pela indução são superiores aos adquiridos com excitação crescente. Há assim um atraso na desmagnetização do material. Este fenómeno denomina-se histerese.

A histerese é comum a todos os materiais ferromagnéticos e tem origem na conversão irreversível entre a energia magnética e a energia térmica que se observa pelo aquecimento do material quando é magnetizado [13]. Ao variar continuamente a excitação entre  $-H_2$  e  $H_2$ , as trocas de energia estabilizam e obtém-se a curva da figura 2.1, a que se dá o nome de ciclo de histerese.

Os ímanes permanentes também são conhecidos por materiais magneticamente duros, o que significa materiais ferromagnéticos com um largo ciclo de histerese.

### 2.2.2 - Inconvenientes da Histerese

A área definida pelo ciclo de histerese é proporcional à energia convertida irreversivelmente em calor durante o processo de magnetização do material, por variação contínua da excitação magnética  $H$ . A esta energia desperdiçada sob a forma de calor chama-se de perdas por histerese. Tal deve-se aos atritos atômicos quando há mudança de estado magnético num material ferromagnético.

Em suma, estas perdas de energia são proporcionais às seguintes grandezas:

- área do ciclo de histerese, dado que há uma relação direta entre os atritos atômicos e a área do ciclo,
- volume do material, pois, quanto maior for o volume maior será a quantidade de átomos que sofrem rotação, e
- número de ciclos realizados.

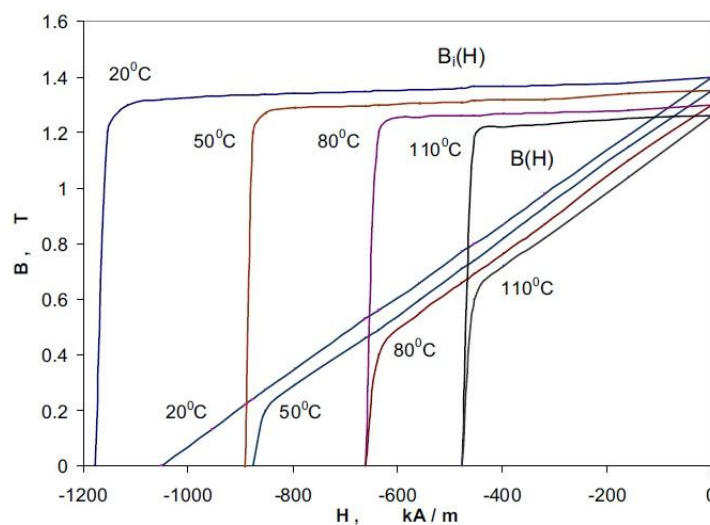
Estas perdas assumem particular importância quando se utiliza corrente alternada dado que esta inverte o sentido constantemente fazendo a indução descrever numerosos ciclos por segundo de acordo com a frequência utilizada [6]. Ou seja, estas perdas são proporcionais a essa frequência.

### 2.2.3 - Curva de Desmagnetização

Existem três parâmetros magnéticos de fundamental importância na escolha de ímanes permanentes para aplicação nas máquinas elétricas. São eles, a indução remanescente  $B_r$ , a coercividade  $H_C$  e o produto energético máximo  $(BH)_{máx}$  [5].

A energia associada a um íman permanente está diretamente relacionada com a dimensão do seu ciclo de histerese. A energia potencial máxima  $(BH)_{máx}$  é medida pelo maior retângulo inscrito no segundo quadrante do ciclo histerético, isto é, na curva de desmagnetização. Pode-se concluir, portanto, que a zona de maior eficiência dá-se nas condições em que o produto energético é máximo.

Na figura 2.2, é possível observar a comparação entre as curvas de desmagnetização normal,  $B(H)$ , e intrínseca,  $B_i(H)$ , de um íman permanente de NdFeB e a sua variação com a temperatura.



**Figura 2.2** - Curva de desmagnetização  $B - H$  'normal' e curva de desmagnetização  $B_i - H$  'intrínseca' para diferentes temperaturas de um íman permanente de NdFeB [1]

As curvas  $B(H)$  representam a curva de desmagnetização normal do respetivo material para diferentes temperaturas. É de destacar a sua linearidade principalmente para baixas temperaturas. Esta linearidade é um dos aspetos mais importantes aquando da seleção de um determinado tipo de íman permanente a utilizar numa máquina elétrica, pois quanto menor for essa linearidade da curva, maior vai ser a facilidade com que o íman se vai desmagnetizar sob o efeito de um campo desmagnetizante [4]. Pode também concluir-se que, quanto maior for a temperatura, menor será o valor do campo coercivo necessário para que ocorra a perda total do magnetismo remanescente presente no íman. No caso de a temperatura continuar a subir, esta atingirá um valor tal que o íman desmagnetizará mesmo sem a influência de um campo desmagnetizante. Isto deve-se ao facto de a agitação atómica, devida à elevação da temperatura, provocar a desorientação dos dipolos magnéticos. A esta temperatura, a partir da qual as propriedades magnéticas dos ímanes permanentes desaparecem, dá-se o nome de temperatura de Curie.

Por sua vez, as curvas  $B_i(H)$  representam as curvas de desmagnetização devidas à presença de material ferromagnético macio em torno dos ímanes, como acontece nas máquinas de ímanes permanentes. Pode-se verificar que, neste caso, a indução magnética  $B_i$  se mantém praticamente constante à medida que a excitação magnética  $H$  aumenta até se atingir o valor do campo coercivo  $H_c$ .

Os motores de ímanes permanentes podem experimentar severos campos de desmagnetização durante o arranque ou devido a curto-circuitos nos enrolamentos estatóricos, pelo que o dimensionamento de uma máquina deste tipo deve utilizar ímanes capazes de sustentar estes campos sem que ocorra perda de magnetismo remanescente.

## 2.2.4 - Parâmetros

De uma forma geral, os ímanes permanentes são caracterizados pelos seguintes parâmetros:

- Indução de Saturação -  $B_S$

Corresponde à densidade de fluxo magnético máximo que se pode obter com um determinado tipo de material quando excitado por um campo magnético  $H_S$  e a sua unidade SI é o Tesla ( $T$ ). Em termos físicos, significa que todos os momentos magnéticos estão alinhados na mesma direção do campo magnético externo aplicado.

- Indução remanescente, remanescência ou remanência -  $B_r$

É o valor da densidade de fluxo magnético retido pelo material após a extinção do campo magnético de excitação  $H$ . Neste ponto, grande parte dos momentos magnéticos mantém a direção definida durante a magnetização. Mede-se em  $T$ .

- Força coerciva, coercividade ou intensidade do campo coercivo -  $H_C$

Corresponde ao valor da intensidade do campo magnético desmagnetizante necessário para desmagnetizar por completo um íman permanente, ou seja, para anular a sua remanência. Em termos práticos, quanto maior for o valor da coercividade maior será a resistência do material a campos desmagnetizantes. A coercividade mede-se em  $A/m$ .

- Produto energético máximo  $(BH)_{máx}$

É o valor de densidade máxima de energia armazenada num íman permanente e a sua unidade é o  $J/m^3$ . Corresponde ao ponto na curva de desmagnetização onde se dá a intercepção com o retângulo de maior área que pode ser inscrito no 2º quadrante do gráfico do ciclo de histerese.

- Temperatura de Curie -  $T_C$

Corresponde ao valor de temperatura a partir do qual as propriedades magnéticas dos ímanes permanentes ficam irreversivelmente afetadas. Quando é atingida tal temperatura, dá-se a desorientação total dos dipólos magnéticos, mesmo na ausência de um campo desmagnetizante.

- Temperatura de Serviço -  $T_S$

Corresponde ao valor máximo de temperatura no qual os ímanes podem operar sem que as suas propriedades magnéticas sofram alterações significativas.

## 2.3 - Classes de Ímanes Permanentes

Os materiais ferromagnéticos utilizados em máquinas elétricas de força motriz podem ser de dois tipos: duros e macios.

A utilização dos materiais magnéticos macios está quase sempre associada com o desejo de aumentar a auto-indução de uma bobina, através da aplicação de um núcleo ferromagnético [2]. Um bom exemplo da sua utilização pode ser encontrado nos estatores das máquinas elétricas, em que os seus enrolamentos se encontram sempre envolvidos pelo empilhamento de finas chapas deste material. O seu ciclo histerético deve ser alto e estreito de forma a reduzir as perdas por histerese ao máximo, devem apresentar uma elevada permeabilidade magnética assim como uma elevada indução de saturação. Por sua vez, tanto a indução remanescente como a coercividade devem assumir valores baixos.

No geral, todos os materiais magnéticos exibem um certo grau de magnetismo permanente. Os materiais magnéticos duros ou ímanes permanentes distinguem-se dos materiais magnéticos macios por reterem um nível de magnetismo muito elevado na ausência de um campo magnético externo e por apresentarem um valor de campo coercivo também muito superior. Interessa assim que estes materiais apresentem um largo ciclo histerético.

Atualmente, existem três classes de ímanes permanentes que são utilizadas em máquinas elétricas. São elas:

- Alnicos
- Ferrites
- Terras raras

As curvas de desmagnetização para alguns tipos de ímanes permanentes das classes acima referidas podem ser visualizadas na figura 2.3 para uma temperatura de 20°C.

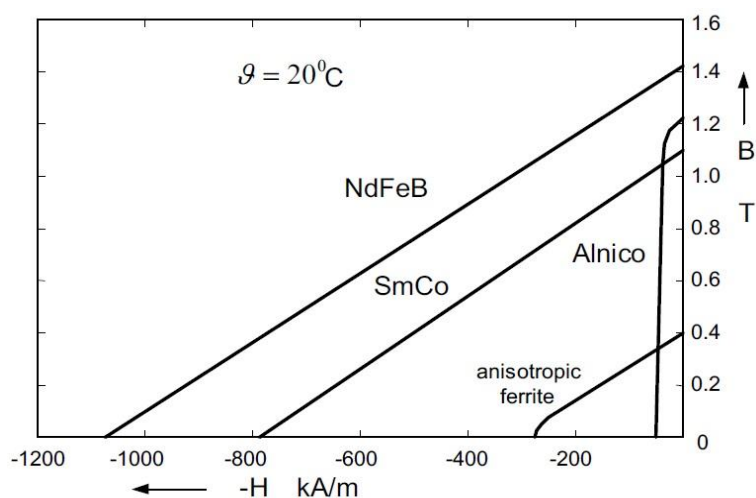


Figura 2.3 - Curvas de desmagnetização para diferentes materiais magnéticos permanentes [1]



Através da análise da figura anterior, conclui-se que os ímanes permanentes de terras raras são aqueles que apresentam maior linearidade na sua curva de desmagnetização, apresentando assim uma maior coercividade a par de uma elevada remanescência.

Por sua vez, verifica-se que as ferrites apresentam maior coercividade que os Alnicos, sendo que estes últimos são facilmente desmagnetizáveis na presença de um campo desmagnetizante, devido ao seu baixo valor do campo coercivo.

### **2.3.1 - Alnicos**

As principais vantagens dos Alnicos são a sua elevada remanência e o seu baixo coeficiente de temperatura. O Alnico 5, como exemplo, apresenta uma temperatura de Curie de 800°C permitindo temperaturas de serviço na ordem dos 525°C [8]. Estas características permitem proporcionar uma elevada densidade de fluxo magnético a altas temperaturas sem que ocorra desmagnetização. A grande desvantagem prende-se com a enorme não linearidade apresentada pela sua curva de desmagnetização, limitando muito a utilização destes ímanes em máquinas elétricas rotativas, devido aos fortes campos de desmagnetização a que estas podem estar sujeitas. Portanto, são ímanes que apresentam um baixo valor de intensidade do campo coercivo.

Os Alnicos dominaram o mercado dos motores elétricos de ímanes permanentes entre a década de 40 e meados da década de 60 do século passado, altura em que as ferrites começaram a impor-se no mercado [1].

### **2.3.2 - Ferrites**

As ferrites foram descobertas na década de 50. São materiais ferrimagnéticos constituídos por óxidos de ferro com a adição de bário (Ba) ou estrôncio (Sr). Em comparação com os Alnicos, apresentam uma coercividade superior, apesar de, a sua indução remanescente ser inferior. A temperatura máxima de serviço pode chegar aos 300°C [9].

Uma das suas principais vantagens está ligada ao seu baixo custo. Os ímanes permanentes baseados em ferrites conseguem proporcionar o melhor custo por unidade de potência de uma máquina elétrica. Economicamente, a sua utilização é mais vantajosa do que os Alnicos para motores de potência nominal a partir de 7,5kW [1]. Outra grande vantagem reside na elevada resistividade elétrica que este material apresenta, o que significa que as perdas por correntes parasitas são baixas, mesmo para altas frequências.

As ferrites de bário são amplamente utilizadas em motores elétricos de corrente contínua nos automóveis (ventilação, para-brisas, vidros-elétricos, etc.) e, sobretudo, em brinquedos.

### 2.3.3 - Terras Raras

Nas últimas três décadas, um grande avanço foi conseguido com o desenvolvimento de ímanes permanentes de elevado produto energético máximo  $(BH)_{m\acute{a}x}$ , os ímanes de terras raras. No geral, os elementos de terras raras não são raros, mas a produção de metais baseados nestes elementos é um processo complexo, limitando assim a sua disponibilidade.

A primeira geração destes ímanes, os ímanes de Samário Cobalto ( $\text{SmCo}_5$ ), foi inventada na década de 60, tornando-se disponível comercialmente no início da década seguinte. Atualmente, a sua produção tem pouco significado, tendo alguma aplicação em casos especiais onde o fator custo não é determinante.

Como principais vantagens apresentam uma elevada indução remanescente, um elevado campo coercivo e, portanto, um elevado produto energético máximo. A sua curva de desmagnetização tem um comportamento linear e a sua temperatura máxima de serviço varia entre os 250°C e os 350°C [10]. No entanto, apresentam uma grande desvantagem, o seu preço. Tanto o Samário (Sm) como o Cobalto (Co) são relativamente caros devido às suas restrições em termos de disponibilidade.

Com a descoberta, em 1983, da segunda geração de ímanes de terras raras, que baseia a sua composição num elemento químico relativamente barato e abundante, o neodímio (Nd), o problema do custo elevado dos materiais magnéticos de  $\text{SmCo}_5$  foi solucionado. No entanto, atualmente, com o monopólio por parte da China na produção destes materiais, o seu preço tem subido bastante. Em Agosto de 2011, o preço do neodímio atingiu um pico de 483USD/kg, representando um aumento de cerca de 10 vezes mais face ao mesmo mês do ano transato e 20 vezes mais face ao mesmo mês do ano 2009, em que o seu preço rondava os 20 USD/kg. A evolução do preço do neodímio nos últimos anos pode ser visualizada na figura 2.4.

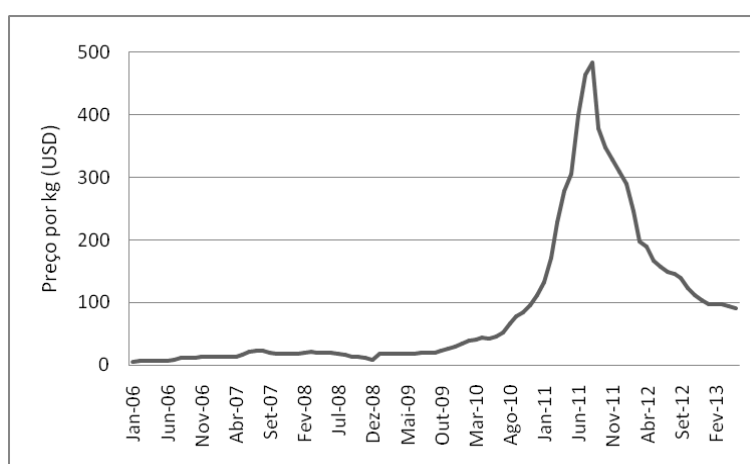


Figura 2.4 - Evolução do preço do neodímio entre 2006 e 2013 [12]

Os ímanes permanentes de neodímio-ferro-boro ( $\text{NdFeB}$ ), que são nos dias de hoje produzidos em grandes quantidades, apresentam propriedades magnéticas melhores do que

os ímanes de  $\text{SmCo}_5$ , mas apenas para temperaturas de serviço inferiores a  $150^\circ\text{C}$ . As suas curvas de desmagnetização, especialmente devido ao campo coercivo, estão fortemente dependentes da temperatura, como se verificou na figura 2.2. Isto significa que, à medida que a temperatura aumenta, a probabilidade deste se desmagnetizar torna-se maior, devido à diminuição do valor do campo coercivo. A sua temperatura máxima de operação pode chegar aos  $230^\circ\text{C}$ , sendo que temperatura de Curie anda pelos  $310^\circ\text{C}$  [11]. São também susceptíveis de corrosão pelo que vêm protegidos com um revestimento, normalmente, de camada tripla de níquel-cobre-níquel.

As suas propriedades magnéticas são muito sensíveis à variação da temperatura. Estas diminuem com o aumento da temperatura mas, normalmente, são restabelecidas quando é atingida novamente a temperatura ambiente.

Estes ímanes têm um grande potencial de evolução, pelo que o seu impacto no mercado de ímanes permanentes tem-se tornado cada vez mais forte. Os últimos desenvolvimentos levaram à conceção de ímanes de  $\text{NdFeB}$  que apresentam um magnetismo remanescente superior e uma estabilidade térmica melhorada.

No presente, a China detém o monopólio de produção de metais de terras raras, principalmente do neodímio. Este metal, importante constituinte dos ímanes permanentes de  $\text{NdFeB}$ , viu o seu preço crescer bastante em 2011 como referido anteriormente. Esta subida deveu-se à instabilidade que se tem sentido no mercado destes metais. A sua causa deve-se à crescente procura a nível mundial aliada ao facto da China, país que se tornou monopolista neste mercado devido à produção destes metais a preços muito baixos nas últimas décadas, ter diminuído a sua exportação por causa da sua crescente necessidade.

Estas variações do preço dos metais de terras raras implicam uma instabilidade do preço final dos ímanes permanentes deste tipo, o que pode levar ao aumento do preço de todas as aplicações que façam uso destes materiais magnéticos, como é o caso das máquinas elétricas.

#### **2.3.4 - Análise Comparativa**

Os materiais magnéticos utilizados para ímanes permanentes apresentam uma série de propriedades específicas que ditam a sua utilização ou não em determinadas aplicações. Por exemplo, numa máquina elétrica interessa que os ímanes permanentes empregues apresentem uma elevada remanência para conseguirem produzir um campo magnético de excitação adequado, uma elevada coercividade para que estes não se desmagnetizem facilmente aquando da presença de fortes campos desmagnetizantes, assim como uma elevada temperatura de operação. Com isto, um fabricante deve conhecer as propriedades inerentes às diferentes classes de ímanes permanentes utilizadas comercialmente, de forma a garantir que o seu produto seja adequadamente fiável sob o ponto de vista magnético, conjugando um preço baixo.

Tabela 2.1 - Propriedades magnéticas de alguns ímanes permanentes [8,9,10,11]

Material	$B_r$ (mT)	$H_c$ (kA/m)	$(BH)_{máx}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	Temp. de Operação (°C)	Tipo
Alnico 5	1250	50	44	525	ACA44
Ferrite	385	250	28	250 - 300	Y30
SmCo	870	600	146	250	Sm <sub>1</sub> Co <sub>5</sub>
NdFeB	1280	915	318	80	N42
NdFeB	1430	796	398	80	N52

Na tabela 2.1, encontram-se representados os valores das propriedades magnéticas mais importantes de algumas das classes de ímanes permanentes com maior impacto comercial. Da sua análise, conclui-se que o Alnico 5 apresenta uma remanência bastante elevada contrariamente à sua coercividade e produto energético máximo, que apresentam valores muito baixos. Este material magnético tem, assim, como grande problema a sua baixa resistência à desmagnetização, pelo que a sua aplicação em máquinas elétricas é muito limitada. Apresenta a temperatura de operação mais elevada de todos os materiais magnéticos permanentes.

No caso das ferrites, é possível verificar que apesar da sua remanência ser menor que aquela apresentada pelos Alnicos, a sua coercividade é bem superior. A sua temperatura de operação apresenta um valor razoável.

Em termos comparativos, verifica-se também que os ímanes de terras raras são aqueles que apresentam os valores mais elevados de indução remanescente, de força coerciva e produto energético máximo. Neste caso, o grande destaque vai para a temperatura de operação dos ímanes de NdFeB que, comparada com as restantes classes de ímanes, é muito baixa. Este é o principal problema destes materiais, pois apresentam coeficientes de temperatura bastante elevados, tornando a sua remanência e força coerciva muito sensíveis à variação da temperatura.

Comercialmente, os ímanes de neodímio são vendidos tendo em conta diferentes patamares de produto energético máximo e temperatura de operação máxima. Assim, se a classificação de um íman de NdFeB for, por exemplo, N42 ou N42-H ou N42-UH, significa que o seu produto energético máximo é de 42 MGOe ( $\sim 318 \text{ kJ/m}^3$ ) e que a sua temperatura de operação máxima é de 80°C, 120°C e 180°C, respetivamente [11].

Na tabela 2.2, pode ser visualizada a sigla a atribuir a cada classe de íman de NdFeB consoante a temperatura de operação máxima. A temperatura de operação máxima para um íman deste tipo pode ser obtida comercialmente pela classe N33-VH/AH, caracterizada por um produto energético máximo de 33 MGOe ( $\sim 239 \text{ kJ/m}^3$ ) e uma temperatura de operação que pode chegar aos 230°C sem alterar as suas propriedades magnéticas. Em jeito de conclusão, deve-se ter a noção de que quanto maior for a temperatura de operação máxima maior será o preço a pagar por este material magnético permanente.

**Tabela 2.2** - Classificação dos ímanes de NdFeB em função da temperatura de op. máxima [11]

<b>Sigla</b>	<b>Temp. de Operação (°C)</b>
-	80
M	100
H	120
SH	150
UH	180
EH	200
VH / AH	230

## 2.4 - Magnetismo Permanente vs Excitação Eletromagnética

Um dos primeiros sistemas de excitação a ímanes permanentes aplicado em máquinas elétricas foi desenvolvido em 1831 por Joseph Henry [1]. Naquela época, vários cientistas investigaram e tentaram desenvolver novas soluções deste tipo. No entanto, não tiveram sucesso devido às fracas qualidades magnéticas que as ligas de aço ou aço-tungsténio utilizadas naquela altura apresentavam, acabando estes sistemas por serem preteridos pelos de excitação eletromagnética. Em 1932, com o desenvolvimento das primeiras ligas de Alnico, o interesse nestes sistemas de excitação volta a surgir. Contudo, a sua aplicação estava limitada a pequenos motores de corrente contínua (CC) de baixa potência nominal.

Apesar das muitas tentativas na construção de uma máquina com excitação através do magnetismo remanescente dos ímanes permanentes, a excitação eletromagnética acabou por se impor e é, ainda hoje, o tipo de excitação utilizado na maior parte das máquinas elétricas. Este tipo de excitação tem como grande vantagem o facto de se conseguir facilmente os valores de excitação magnética desejados.

A máquina elétrica de CC convencional foi a primeira máquina a ser utilizada industrialmente devido ao facto de, inicialmente, a energia elétrica ser distribuída em corrente contínua. É uma máquina de excitação eletromagnética muito cara, de baixo rendimento e necessita de uma grande manutenção devido principalmente ao seu sistema coletor/escovas, sendo que este sofre um grande desgaste e comporta-se como uma espécie de travão devido ao atrito causado pelo contacto das escovas com o coletor.

Por outro lado, a máquina síncrona convencional, muito utilizada como gerador, pode ter dois tipos de excitatrizes. Um é a excitatriz com escovas, em que o enrolamento indutor é alimentado através de anéis coletores e escovas e, o outro, é a excitatriz sem escovas (*brushless*) que possui um sistema de excitação girante. Conclui-se, assim, que para se proceder à excitação da máquina tem de se recorrer a sistemas complementares para essa função, sujeitos a desgaste e manutenção constante, tornando assim este tipo de máquina mais cara.

No caso da máquina assíncrona, a excitação é, também ela, eletromagnética. Se o rotor for bobinado, existe um sistema de anéis/escovas que permite o seu acesso do exterior. Se o rotor for em gaiola, não há necessidade de recorrer a este sistema, tornando o motor mais robusto e barato. No entanto, o entreferro deve ser o mais pequeno possível para reduzir a relutância magnética total do circuito e, assim, aumentar a indução e, consequentemente, o fluxo magnético. O seu rendimento e fator de potência também não são os mais elevados, tendo em conta que esta máquina já atingiu um patamar de maturidade considerável.

Assim, com o surgimento de novos ímanes permanentes de elevado produto energético máximo, os fabricantes de máquinas elétricas encontraram uma oportunidade de tentar superar grande parte das desvantagens inerentes às máquinas anteriormente referidas. A utilização de ímanes permanentes na construção de máquinas elétricas melhora significativamente a sua performance em comparação com aquelas que utilizam a excitação eletromagnética, que dominou o tipo de excitação utilizada na maioria das máquinas elétricas no século passado.

As vantagens da utilização de ímanes permanentes em máquinas elétricas são inúmeras:

- rendimento superior, pois não existe necessidade de energia elétrica para alimentar o sistema de excitação, logo as perdas elétricas são menores,
- potência e binário da máquina por unidade de peso superior,
- desempenho dinâmico superior,
- construção simples e manutenção muito reduzida,
- preço tende a baixar com a descida do custo dos materiais magnéticos.

O sistema de excitação com ímanes permanentes torna-se, assim, como uma opção cada vez mais atrativa com inúmeras vantagens, permitindo tornar as máquinas elétricas cada vez mais eficientes com o aumento do seu rendimento e aumento do fator de potência. A eliminação de sistemas de excitação complexos e de manutenção elevada levam, também, a uma diminuição do custo.

## 2.5 - Máquinas de Ímanes Permanentes

O elevado potencial das máquinas de ímanes permanentes prende-se fundamentalmente com dois fatores. O primeiro, e mais decisivo, está relacionado com o aparecimento dos materiais magnéticos permanentes baseados em terras raras. Devido à sua elevada eficiência energética, estes materiais permitem uma reconfiguração dos circuitos, permitindo configurações e volumetrias não praticáveis com as máquinas convencionais.

O segundo fator está relacionado com o estado de maturidade já atingido pelos sistemas de conversão eletrónica de energia, que permitem o desacoplamento da máquina elétrica da rede, com a consequente eliminação de dispositivos de interface.

Na década de 80, com o surgimento de ímanes permanentes de alto produto energético máximo a um baixo preço, os ímanes de NdFeB, os fabricantes de máquinas elétricas rotativas aumentaram o seu interesse em desenvolver máquinas síncronas de ímanes permanentes, devido às vantagens obtidas face ao uso tanto das máquinas síncronas convencionais como das máquinas assíncronas.

Do ponto de vista funcional, as máquinas síncronas de ímanes permanentes são comparáveis às máquinas síncronas convencionais, com as vantagens da ausência do sistema indutor clássico, constituído por anéis e escovas, o que as torna mais fiáveis, de maior rendimento e com custos de manutenção muito reduzidos. Sob o ponto de vista estrutural, são caracterizadas por uma simplicidade similar às máquinas de indução.

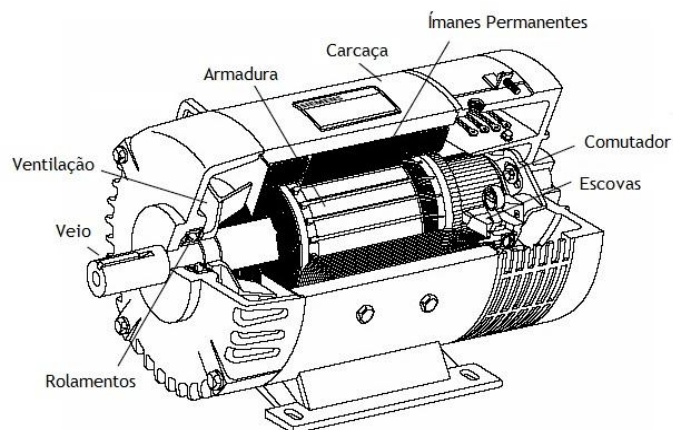
No geral, as máquinas que incorporam ímanes permanentes podem ser classificadas em três grupos distintos:

- Máquinas C.C. com escovas (*brush*)
- Máquinas C.C. sem escovas (*brushless*)
- Máquinas C.A. síncronas

### 2.5.1 - Máquinas C.C. com Escovas

As máquinas C.C. com escovas que utilizam ímanes permanentes, conhecidas na literatura anglo-saxónica como '*PM d.c. brush commutator machines*', são máquinas de corrente contínua amplamente encontradas em aplicações de potências muito reduzidas, como o caso de brinquedos e pequenos eletrodomésticos. Para potências mais elevadas, a sua aplicação tem pouco significado devido às desvantagens apresentadas quando comparadas com as suas máquinas concorrentes. O seu custo, mais elevado que um motor de corrente alternada para a mesma potência, uma maior manutenção e um rendimento comparativamente mais baixo, tornam esta máquina economicamente menos viável.

Inicialmente, foram desenvolvidas máquinas deste tipo que utilizavam Alnicos como ímanes permanentes mas, devido ao seu baixo campo coercivo, não permitiam a sua aplicação em máquinas de potências elevadas. Isto acontece devido aos fortes campos de desmagnetização a que as máquinas elétricas de potências razoáveis ficam sujeitos durante o seu funcionamento, principalmente em regime transitório. Com o aparecimento das ferrites, os Alnicos rapidamente começaram a ser substituídos, fabricando-se motores para diversas gamas de potência nominal que iam até 150kW [1].

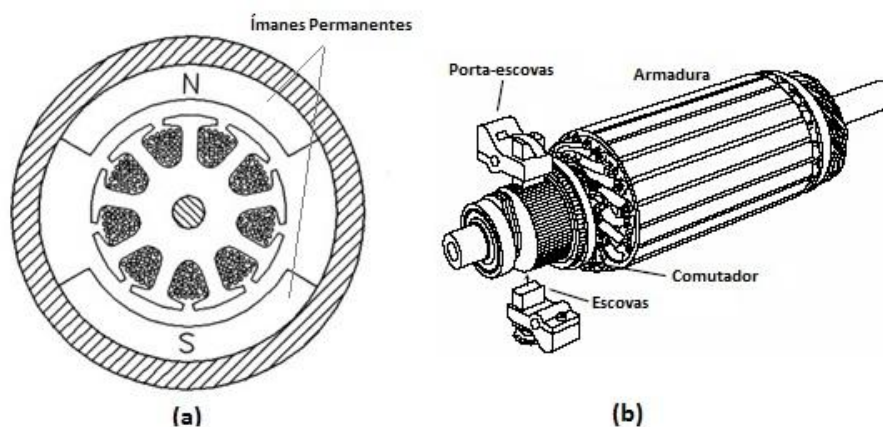


**Figura 2.5** - Corte longitudinal de uma máquina C.C. de ímanes permanentes com escovas [1]

Na figura 2.5, encontra-se representada uma máquina C.C. com escovas. Esta máquina pode ser comparada com a máquina C.C. convencional de excitação separada, mas, em vez dos habituais enrolamentos de cobre, o estator é constituído por ímanes permanentes, sendo estes os responsáveis pelo fornecimento do fluxo magnético indutor. Assim, o fluxo de excitação gerado pelos ímanes no entreferro é constante, não podendo este ser controlado. Isto significa que, em funcionamento como motor, a velocidade de rotação do rotor só pode ser controlada através da tensão aplicada à armadura ou pela variação da resistência dos enrolamentos desta através de um reóstato.

O rotor é constituído por um núcleo ferromagnético, formado por chapas laminadas e isoladas entre si para reduzir as perdas magnéticas. Possui ranhuras na periferia onde são alojados os vários enrolamentos, constituídos por conjuntos de bobinas. As extremidades dos enrolamentos são ligadas a lâminas de cobre situadas no comutador.

O conjunto roda solidário com o veio e é suportado, nas extremidades, por rolamentos fixados na carcaça.



**Figura 2.6-** Constituição dum motor C.C. de ímanes permanentes com escovas: (a) Estator (b) Rotor [1]



Como se pode ver na figura 2.6 (b), a constituição do rotor, para além da armadura, inclui o sistema comutador/escovas. O comutador, também designado por coletor, é constituído por lâminas condutoras de cobre isoladas entre si, que rodam em conjunto com o veio e que têm apoiadas sobre si as escovas.

Cada par de lâminas é ligado a um enrolamento do induzido, permitindo esta disposição, quando o rotor roda, que as lâminas deslizem em contacto com as escovas, possibilitando a alimentação dos enrolamentos do induzido a partir do exterior.

Este sistema comutador/escovas apresenta-se como um dos grandes inconvenientes destas máquinas pelas razões já referidas anteriormente, pois o desgaste das escovas provocado pela fricção entre o contacto destas com o comutador é elevado, tornando a manutenção deste sistema frequente [17].

### 2.5.2 - Máquinas C.C. sem Escovas

A máquina C.C. sem escovas, conhecida na literatura anglo-saxónica como '*PM d.c. brushless machine*', é uma máquina elétrica de corrente contínua em que a operação de comutação é realizada por um comutador eletrónico. Quer isto dizer que o sistema comutador/escovas tradicional não existe, traduzindo-se numa enorme vantagem face à máquina que faz uso deste sistema.

Pela análise da figura 2.7, pode-se concluir que, ao nível estrutural, a máquina C.C. sem escovas é muito diferente da máquina C.C. com escovas. Os ímanes permanentes encontram-se alojados no rotor, sendo este o responsável pelo processo de criação do fluxo de excitação. Por sua vez, a alimentação da máquina é feita pelo lado do estator. O seu núcleo é constituído pelo empilhamento de finas chapas ferromagnéticas isoladas entre si, com os enrolamentos colocados nas suas ranhuras e dispostos axialmente na sua periferia interna.

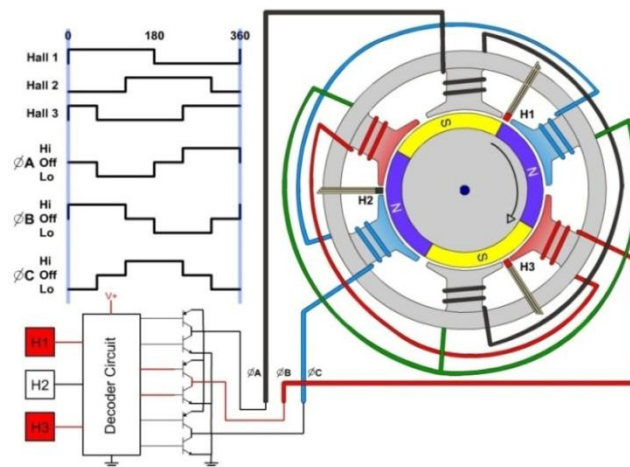


Figura 2.7 - Constituição de um motor C.C. de ímanes permanentes sem escovas [4]

Sendo a operação de comutação efetuada eletronicamente, esta máquina não possui o tradicional sistema coletor/escovas. Para que o rotor rode, os enrolamentos do estator têm de ser alimentados com tensão contínua com uma determinada sequência. Para tal, é necessário conhecer-se a sua posição para determinar qual ou quais os enrolamentos que devem ser alimentados. Tipicamente, existem sensores de efeito de Hall (H1, H2 e H3 da figura 2.7) que, detetando a presença dos pólos magnéticos, enviam sinais ao controlador eletrónico sobre a posição do rotor.

Após uma análise comparativa da máquina C.C. com escovas com a máquina C.C. do tipo *brushless*, para além das diferenças construtivas ao nível do estator e do rotor já referidas, a grande vantagem advém do facto do sistema coletor/escovas não existir nas máquinas do tipo *brushless*. Este sistema, para além do seu elevado desgaste proporcionar uma elevada manutenção, diminui o rendimento da máquina, visto que as perdas mecânicas causadas pelo atrito existente entre as escovas e o comutador são consideráveis. Outra vantagem da máquina *brushless* prende-se com o facto das perdas do tipo joule ocorrerem no lado do estator, onde as condições de transferência de calor são boas. O mesmo não acontece no motor com comutador visto que estas perdas ocorrem no rotor. Em consequência, melhorias significativas na dinâmica da máquina são obtidas devido à capacidade de se poder criar um maior fluxo magnético girante no entreferro, à baixa inércia do rotor e ao facto da velocidade do rotor não estar dependente da corrente de excitação, como acontece na máquina C.C. com escovas. Deste modo, um decréscimo do volume da máquina *brushless* na ordem dos 40 a 50% é conseguido, para a mesma potência mecânica, como se pode ver na figura 2.8.

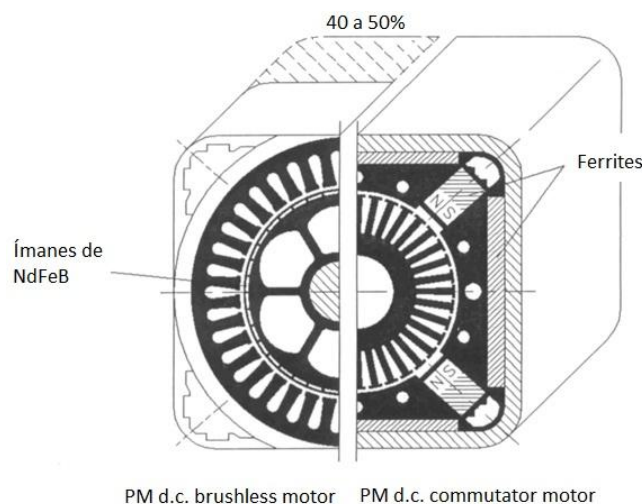


Figura 2.8 - Comparação entre um motor C.C. de ímanes permanentes sem e com escovas [1]

### 2.5.3 - Máquina C.A. Síncrona

A máquina síncrona de ímanes permanentes é uma máquina de corrente alternada que, estruturalmente, é muito idêntica à máquina C.C. do tipo *brushless* vista anteriormente. Na literatura anglo-saxónica é designada por '*PM Synchronous Machine*'. Com a descoberta dos ímanes permanentes de terras raras, o interesse no desenvolvimento destas máquinas disparou, levando muitos fabricantes de máquinas elétricas rotativas a construírem novos modelos que, cada vez mais, conseguem fazer frente às máquinas mais utilizadas, como é o caso da máquina síncrona convencional ou da máquina de indução.

Esta máquina é, frequentemente, comparada com a máquina síncrona convencional. Ao nível funcional é praticamente idêntica, distinguindo-se pelo facto do seu campo magnético indutor ser constante, originado pela presença dos ímanes permanentes no rotor. Assim, os enrolamentos de campo da máquina síncrona convencional são substituídos por ímanes permanentes de elevado produto energético máximo, como é o caso dos ímanes de neodímio-ferro-boro. Como não possui enrolamento rotórico, também não existe a necessidade de aplicação do sistema de anéis/escovas, reduzindo bastante o nível de manutenção. As perdas, tanto mecânicas como no cobre, são assim menores, pelo que o seu rendimento é superior. A sua relação binário/volume é também melhorada.

A maior desvantagem da máquina síncrona de ímanes permanentes reside na falta de controlo da tensão aos seus terminais, assim como do fator de potência. No entanto, o desenvolvimento de semicondutores de comutação forçada, permitiu que, quando associados a estas máquinas, concorram com as máquinas síncronas convencionais em aplicações de potência média, controlando aquelas características [14].

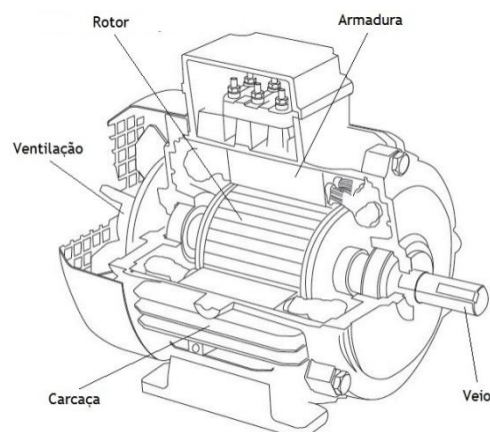


Figura 2.9 - Máquina Síncrona de Ímanes Permanentes [5]

**Tabela 2.3** - Designações das máquinas de ímanes permanentes de acordo com as direções do fluxo no entreferro e no núcleo do estator [15]

Fluxo no entreferro	Fluxo no núcleo do estator	Designação
Radial	Transversal	Fluxo transversal
Axial	Transversal	
Radial	Longitudinal	Fluxo radial
Axial	Longitudinal	Fluxo axial

As conceções topológicas possíveis das máquinas de ímanes permanentes são definidas através de duas características básicas:

- orientação do fluxo no entreferro relativamente ao eixo de rotação: radial ou axial;
- orientação do fluxo no núcleo do estator relativamente à direção do movimento do rotor: transversal ou longitudinal

As designações que resultam das quatro combinações possíveis das características básicas classificativas das máquinas de ímanes permanentes são apresentadas na tabela 2.3.

Atualmente, os motores de fluxo radial são bastante comuns, enquanto que, o número de aplicações com motores de fluxo axial tem vindo a crescer nos últimos anos devido à sua elevada densidade de potência e capacidade de aceleração.

A investigação associada às máquinas síncronas de ímanes permanentes envolve principalmente a otimização das configurações rotóricas, tendo como base a redução do peso e/ou do custo do rotor. Em termos dos parâmetros da máquina, a otimização do rotor deve maximizar a indução magnética no entreferro e minimizar o fluxo de fugas entre os ímanes, que não contribui para o processo de conversão de energia. Outra consideração que afeta a configuração rotórica é o número e localização das barras amortecedoras. Finalmente, a otimização rotórica é função do tipo de material magnético permanente utilizado.

## 2.6 - Aplicações das Máquinas de Ímanes Permanentes

Uma análise ao mercado dos acionamentos eletromecânicos permite chegar à conclusão de que a venda de máquinas de corrente contínua convencionais com escovas tem decrescido nos últimos anos, sendo que, com as máquinas de corrente alternada o panorama é o oposto. No caso das máquinas síncronas de ímanes permanentes, para o aumento na sua procura muito contribuiu o aparecimento dos materiais magnéticos permanentes de neodímio-ferro-boro, permitindo conceber-se máquinas cada vez mais robustas, com uma necessidade de manutenção mínima e de rendimento muito elevado.

### 2.6.1 - Máquina C.C.

As primeiras máquinas de ímanes permanentes a serem comercializadas em grande escala apareceram com o desenvolvimento dos Alnicos. Eram máquinas C.C. com escovas que apresentavam alguns inconvenientes já referidos na secção anterior. A baixa coercividade, aliada à baixa indução magnética presente nestes ímanes permanentes, não permitia o desenvolvimento de máquinas para aplicações que necessitavam de elevadas potências de funcionamento. Com o aparecimento das ferrites, rapidamente se desenvolveram motores de potência superior que chegavam até aos 150kW de potência nominal [1].

Apesar de, atualmente, os Alnicos ainda terem alguma utilidade em pequenos motores que necessitam de operar em condições de elevada estabilidade térmica, pois são ímanes que apresentam como grande vantagem a elevada estabilidade das suas propriedades magnéticas em condições diversas de temperatura, a maior parte dos motores C.C. com escovas vem equipado com ferrites [2].

Estes motores representam uma solução simples e de baixo custo para acionamentos de velocidade variável que não têm como requisitos principais uma baixa manutenção, operação sob condições adversas e que não necessitem de operar em sincronismo com outros grupos de máquinas. A sua grande aplicação baseia-se em pequenos motores de potência nominal reduzida como aqueles usados no ramo automóvel, pequenos eletrodomésticos e brinquedos. Na figura 2.10 encontra-se representada uma chave de fendas elétrica que faz uso de um motor C.C. com escovas.

As máquinas com escovas têm nos dias de hoje um concorrente de peso para pequenas aplicações: as máquinas CC do tipo *brushless*. Estas máquinas aliadas a um conversor eletrónico, são facilmente controláveis. Apresentam a grande vantagem de não possuírem o sistema coletor/escovas, apresentando assim uma manutenção bastante reduzida. Uma melhoria substancial ao nível do seu rendimento também é conseguida, pois são máquinas muito mais robustas. Estas máquinas rapidamente tiveram impacto comercial em diversos setores, sendo a sua maior aplicação representada por motores de baixa potência e que, em grande parte das aplicações, exigem elevadas velocidades de funcionamento. Na figura 2.11 pode ser visualizado um disco rígido, uma aplicação onde motores C.C. do tipo *brushless* são frequentemente utilizados.

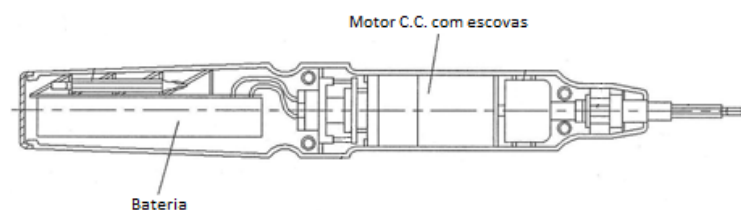
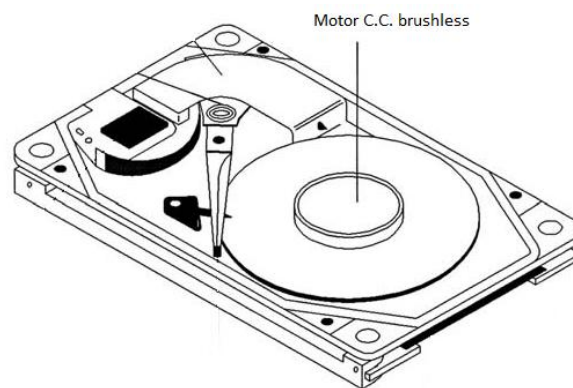


Figura 2.10 - Chave de fendas elétrica sem fios equipada com motor CC com escovas [1]



**Figura 2.11** - Disco rígido equipado com um motor CC do tipo *brushless* [1]

Estes motores de baixa potência são especialmente utilizados em equipamentos informáticos, equipamentos automóveis, equipamentos médicos, equipamentos de escritório, instrumentação de medida e controlo e sistemas robóticos.

### 2.6.2 - Máquinas C.A.

As máquinas síncronas de ímanes permanentes, com a invenção dos ímanes de terras-raras, voltaram a ter um papel preponderante nos planos de desenvolvimento de novos tipos de máquinas elétricas por parte dos fabricantes. Caracterizada por uma elevada robustez e fiabilidade, baixo nível de manutenção, elevado rendimento e fator de potência, assim como um preço cada vez mais competitivo, fez desta máquina um forte concorrente à supremacia das máquinas convencionais síncronas e assíncronas para baixas/médias potências.

Esta máquina síncrona tem uma aplicação muito abrangente como motor, podendo praticamente substituir o motor de indução muito utilizado atualmente, com a vantagem de permitir uma maior poupança de energia elétrica devido ao seu menor consumo para a mesma gama de potência nominal.

Os motores síncronos de ímanes permanentes podem ser aplicados em bombas, ventiladores, exaustores, britadores, compressores, sistemas de propulsão, entre outros. Têm também aplicação militar e aeroespacial, principalmente em unidades de potência auxiliar, pela reduzida dimensão que podem assumir. Na figura 2.12 pode ser visualizado um sistema de bombeamento de água que utiliza um motor síncrono de ímanes permanentes.

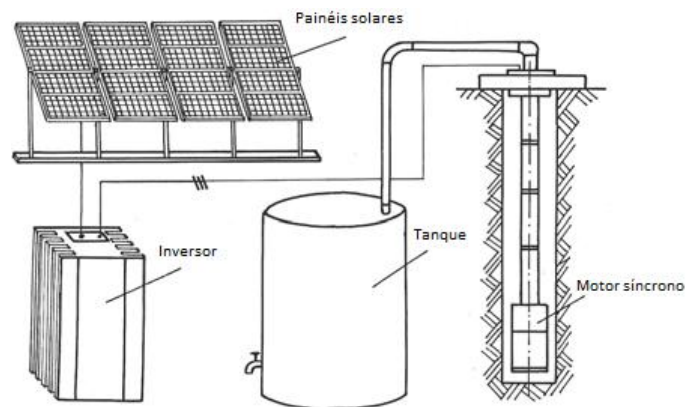


Figura 2.12 - Sistema de bombeamento de água [1]

As máquinas síncronas de ímanes permanentes têm sido, ainda, aplicadas como gerador de energia elétrica, principalmente no campo das energias renováveis. A sua utilização como gerador isolado, já com centenas de kilowatts, apresenta vantagens relativamente ao gerador de indução, na medida em que se torna menos exigente em termos de correção do fator de potência. A aplicação destas máquinas em aproveitamentos eólicos tem-se tornado numa opção cada vez mais viável, pois dispõem de suficiente flexibilidade construtiva, podendo ser acionadas a velocidades reduzidas, permitindo eliminar a caixa de velocidades, o que se traduz numa redução do peso e ruído e num aumento do rendimento e da fiabilidade do sistema.

Aerogeradores equipados com máquinas síncronas de ímanes permanentes com potências iguais ou superiores a 2MW são hoje produtos de grandes fabricantes, acentuando a tendência de utilização crescente da máquina por parte dos mesmos [15]. Na figura 2.13 pode ser visualizada uma turbina eólica *offshore* equipada com um gerador síncrono de ímanes permanentes construída pela construtora ALSTOM. Esta máquina de última geração tem uma potência nominal de 6MW.



Figura 2.13 - Aerogerador equipado com um gerador síncrono de ímanes permanentes [46]

Por fim, é de destacar a aplicação deste tipo de motores na área da tração elétrica. Grandes construtores de automóveis, face ao crescente interesse pelo desenvolvimento de veículos elétricos, têm desenvolvido soluções que utilizam o motor síncrono de ímanes permanentes para fornecer energia mecânica às rodas do veículo. No entanto, com os últimos desenvolvimentos relativamente à variação do preço dos ímanes permanentes de NdFeB, os construtores têm tido alguma precaução quanto à utilização deste tipo de motor para a produção em massa de veículos elétricos, visto que, se o preço dos ímanes tornar esta solução economicamente inviável, a sua aplicação poderá tornar-se desvantajosa quando comparada com outros tipos de motores elétricos.

## 2.7 - Síntese

Este capítulo focou-se, inicialmente, na descrição dos acontecimentos chave que marcaram a evolução dos materiais magnéticos permanentes.

A importância do conhecimento da curva de desmagnetização do ciclo de histerese destes materiais, assim como das suas propriedades mais relevantes a ter em conta na escolha destes materiais, foi evidenciada.

As classes de ímanes permanentes com maior impacto comercial foram distinguidas. Os Alnicos, as ferrites e os ímanes de terras-raras têm grande aplicação nas mais diversas áreas.

As vantagens e as desvantagens da excitação processada nas máquinas elétricas rotativas através de ímanes permanentes foram descritas. Foi feita, também, uma breve comparação com a excitação eletromagnética, muito utilizadas nas máquinas elétricas rotativas convencionais.

Por fim, efetuou-se uma descrição, não exaustiva, das principais máquinas elétricas rotativas que utilizam ímanes permanentes, referenciando-se algumas aplicações das mesmas como motor. A aplicação destas como gerador em aproveitamentos eólicos foi, também, destacada.



## Capítulo 3

# Motor Síncrono de Ímanes Permanentes

Neste capítulo é feito um estudo aprofundado do motor síncrono de ímanes permanentes. São evidenciados os seus aspetos construtivos, o seu princípio de funcionamento e as suas principais características. A problemática do arranque é também estudada. Por fim, é feita uma análise comparativa deste motor com outras alternativas existentes no mercado, tentando perceber qual a solução tecnológica que se enquadra melhor para se impor no mercado a médio/longo prazo.

### 3.1 - Introdução

As máquinas elétricas rotativas com alimentação trifásica, assim como a maioria das máquinas elétricas rotativas, podem funcionar como motor ou como gerador. Como motor convertem energia elétrica, a partir de uma fonte, em energia mecânica, que aciona uma carga acoplada ao veio. Como gerador processa-se o contrário, ou seja, convertem energia mecânica em energia elétrica.

Estas podem ser síncronas ou assíncronas. Nos motores síncronos, a velocidade angular do veio é constante e independente da carga a ele acoplada, isto até um determinado valor crítico de binário de carga. Neste caso, a velocidade só depende da frequência  $f$  de alimentação e do número de pares de pólos  $p$ , como se pode perceber pela análise da expressão 3.1. Nos motores assíncronos há uma queda da velocidade angular quando é acoplada carga ao veio, portanto, a velocidade para além de depender da frequência e do número de pares de pólos, também depende do binário de carga.

Nas soluções trifásicas mais comuns, estas máquinas possuem no estator enrolamentos trifásicos destinados a serem percorridos por um sistema trifásico de correntes, que criarão uma força magnetomotriz (fmm) e um campo magnético girante - o campo magnético girante do estator [19]. Chama-se velocidade de sincronismo,  $n_s$ , à velocidade de rotação do campo magnético girante do estator, cujo valor é determinado por:

$$n_s = \frac{f}{p} \times 60 \text{ [r.p.m.]} \quad (3.1)$$

Com efeito, nas máquinas síncronas a velocidade de rotação do veio é igual à velocidade de sincronismo. Assim, as máquinas síncronas operam a velocidade constante em absoluto sincronismo com a frequência da tensão de alimentação. Estas encontram-se divididas em quatro categorias:

- Máquinas de excitação eletromagnética
- Máquinas de ímanes permanentes
- Máquinas de relutância
- Máquinas de histerese

As máquinas de excitação eletromagnética, ou seja, as máquinas síncronas convencionais, são atualmente uma tecnologia que se encontra num estado de maturação muito elevado. São máquinas amplamente utilizadas em sistemas de velocidade variável de grande potência, assim como na geração térmica e hídrica. Para sistemas de pequena potência, utilizam-se as suas variantes que resultam do uso de ímanes permanentes no circuito de excitação - as máquinas síncronas de ímanes permanentes -, do aproveitamento do efeito de relutância magnética - máquinas síncronas de relutância - ou do aproveitamento do efeito de histerese magnética de certos materiais - máquinas síncronas de histerese.

Para aplicações de baixa/média potência torna-se vantajosa a substituição do enrolamento indutor, presente no rotor dos motores síncronos, por ímanes permanentes. Perde-se a capacidade de regulação do fator de potência, mas ganha-se a vantagem de não ser necessário o sistema de anéis/escovas, nem o circuito elétrico de excitação, bem como todo o sistema de controlo desta corrente. O mesmo se passa com as máquinas de relutância e com as de histerese.

Na figura 3.1, encontra-se representado um rotor de uma máquina síncrona convencional equipado com os anéis que constituem o sistema anéis/escovas. Como se pode reparar, este sistema é bastante complexo, encarecendo bastante a máquina, pelo que para aplicações de potências mais reduzidas pode tornar-se numa solução economicamente inviável. Por outro lado, as escovas são suscetíveis de um enorme desgaste, aumentando muito o nível de manutenção da máquina.

Perante isto, a utilização de ímanes permanentes neste tipo de máquinas torna-se economicamente viável para aplicações de potências mais reduzidas, conseguindo-se obter motores muito mais robustos, fiáveis, energeticamente mais eficientes e com custos de manutenção muito mais baixos.



**Figura 3.1-** Rotor de uma máquina síncrona convencional equipado com anéis [19]

As máquinas de ímanes permanentes atuais são bastante competitivas, tanto com as máquinas síncronas convencionais como com as de indução. Estruturalmente, estas devem ser o mais simples possível para que da sua construção resulte um preço capaz de competir com outras máquinas de igual potência nominal.

As máquinas síncronas de ímanes permanentes podem ser classificadas como máquinas síncronas especiais devido à inexistência de corrente de excitação. O campo indutor é criado pelos ímanes inseridos no rotor, o que é equivalente a ter uma máquina síncrona com o rotor excitado por uma corrente constante. Quanto mais potentes forem os ímanes, maior será o valor do binário máximo que a máquina é capaz de produzir.

O desenvolvimento das máquinas de ímanes permanentes tem resultado da melhoria das características dos materiais magnéticos, nomeadamente nos últimos trinta anos, desenvolvendo esse que se traduziu pelo aumento das potências disponíveis, do factor de potência e do respetivo rendimento.

A utilização destas máquinas em aplicações exigentes e com características melhoradas é também devida ao uso de sistemas de controlo baseados em electrónica de potência a custos acessíveis.

Estas máquinas síncronas, como visto anteriormente, podem funcionar como motor ou como gerador. Apesar do crescente interesse da sua aplicação como gerador, como no caso da produção eólica, é como motor que tem tido maior aplicação. O número de aplicações tem crescido muito rapidamente, sendo hoje uma máquina que se está a impor nos sistemas de automatismos industriais e robótica [24].

Como motor, esta máquina tem um concorrente de peso - o motor de indução. Atualmente, o motor de indução representa entre 80% a 85% dos motores elétricos em serviço no mundo [20], pelo que os fabricantes de motores síncronos de ímanes permanentes têm de conceber máquinas que superem a performance daquele a um preço igual ou inferior.

### 3.2 - Aspetos Construtivos

Do ponto de vista eletromagnético, uma máquina elétrica rotativa é constituída, fundamentalmente, por duas partes distintas, uma designa-se de indutor e outra de induzido.

No indutor é gerado o campo magnético de excitação, e no induzido, também denominado por armadura, processam-se os fenómenos eletromagnéticos. Uma das partes é fixa e a outra é móvel. À parte fixa dá-se o nome de estator e à parte móvel, de rotor. O espaço existente entre estas duas partes designa-se de entreferro.

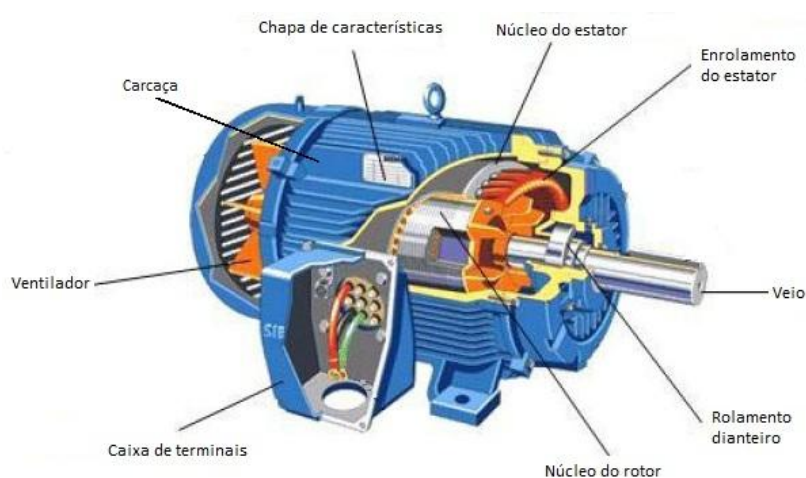
No caso do motor síncrono de ímanes permanentes, o indutor, ou seja, o responsável pelo fluxo de excitação da máquina, situa-se no rotor. Isto deve-se à presença dos ímanes permanentes neste. Por sua vez, o induzido situa-se no estator, e é constituído pelo enrolamento trifásico.

A máquina síncrona de ímanes permanentes apresenta uma constituição análoga à das máquinas síncronas convencionais constituídas por um estator semelhante ao utilizado nas máquinas clássicas (síncronas ou assíncronas), em que os enrolamentos estão dispostos em ranhuras. Na maioria das configurações rotóricas, os ímanes permanentes são colocados no interior da sua estrutura, podendo também ser aplicados à sua superfície[21].

Como visto no capítulo anterior, estas máquinas podem tomar diferentes designações de acordo com a orientação do fluxo no entreferro e no núcleo do estator. Atualmente, os motores de fluxo radial são os mais comuns. Ainda assim, o número de aplicações com motores de fluxo axial tem vindo a crescer nos últimos anos devido à sua elevada densidade de potência e capacidade de aceleração [22]. Na figura 3.2, é possível visualizar-se a estrutura de um motor síncrono de ímanes permanentes de fluxo radial.

O motor síncrono de ímanes permanentes utilizado durante a investigação experimental deste trabalho é um motor de fluxo radial, pelo que o estudo irá centrar-se neste tipo de motores. Sempre que o texto se referir ao motor síncrono de ímanes permanentes, supõe-se que se trata de um motor de fluxo radial.

Os principais componentes constituintes do motor síncrono de ímanes permanentes encontram-se a seguir descritos.



**Figura 3.2** - Estrutura de um motor síncrono de ímanes permanentes de fluxo radial [25]

### 3.2.1 - Carcaça

A carcaça em motores de pequena/média dimensão é fabricada em ferro fundido ou alumínio injetado. Em motores de grande dimensão pode ser realizada em estrutura soldada. Esta destina-se a alojar o estator e o rotor, envolvendo habitualmente o estator com tampas nas extremidades que podem funcionar como elementos de apoio do próprio veio. Tem também a função de proteger os componentes do motor dos efeitos prejudiciais do ambiente em que o mesmo opera, sendo que o tipo de carcaça definirá os índices de proteção e de montagem, nomeadamente [20].

### 3.2.2 - Estator

O estator que compõe o motor síncrono de ímanes permanentes é, geralmente, semelhante ao das máquinas convencionais (síncronas e assíncronas). O seu núcleo é constituído pelo empilhamento de finas chapas de material ferromagnético em forma de anel isoladas entre si (figura 3.3), conduzindo a um efetivo aumento da resistência transversal do circuito magnético, contribuindo assim para uma redução substancial das correntes de Foucault e das perdas magnéticas por si originadas [18]. As chapas possuem ranhuras nas quais são colocados os condutores que constituem o enrolamento, normalmente trifásico. O enrolamento pode ser realizado em fio ou barra de cobre, dependendo da potência da máquina. O circuito elétrico é isolado do circuito magnético por meio de um material isolante, como se pode ver na figura 3.4 (a).

As chapas possuem uma elevada permeabilidade magnética, criando um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, diminuindo assim o fluxo de dispersão e concentrando o campo no entreferro. Estas chapas são, em geral, tratadas termicamente a fim de reduzir o valor das perdas específicas por correntes induzidas.

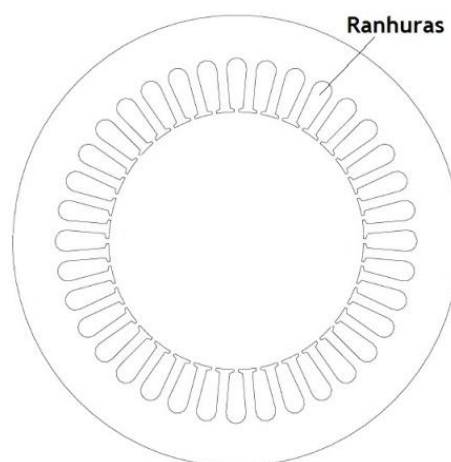
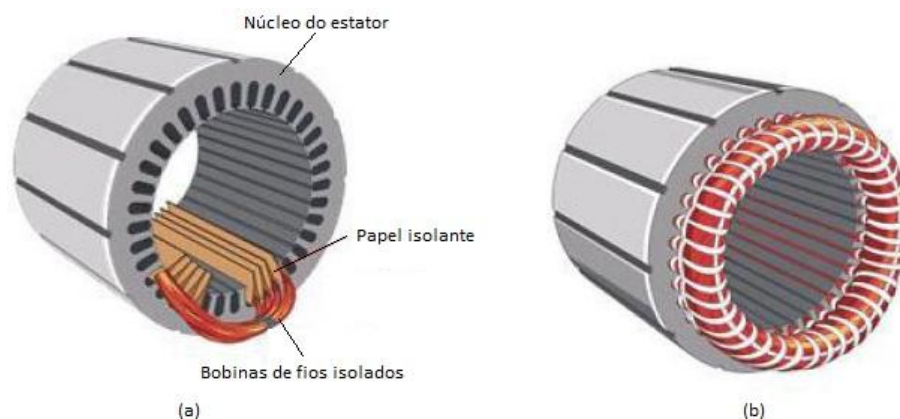


Figura 3.3 - Forma anelar das chapas estatóricas



**Figura 3.4** - Estator de um motor síncrono de ímanes permanentes: (a) execução dos enrolamentos; (b) núcleo com enrolamento completo [25]

A presença das ranhuras além de diminuir o entreferro efetivo, quando comparado com o entreferro do estator não ranhurado em que os enrolamentos são colocados à superfície, também é um meio bastante eficiente de transmissão de calor para o exterior. No entanto, a sua presença no circuito magnético do estator provoca variações periódicas na forma de onda da indução magnética no entreferro, o que resulta em harmônicos na forma de onda da força eletromotriz induzida. Este efeito pode ser minimizado inclinando os ímanes no rotor de um passo de ranhura do estator [14]. A inclinação dos ímanes, embora reduza ligeiramente o valor eficaz da tensão induzida, é eficaz na redução do seu conteúdo harmônico e dos binários de relutância parasitas.

Na figura 3.4 pode ser visualizado o estator de um motor síncrono de ímanes permanentes, primeiramente na fase de montagem dos enrolamentos estatóricos (a) e, de seguida, após a conclusão dessa mesma montagem (b).

Normalmente, o estator de um motor síncrono de ímanes permanentes possui dois pares de pólos, obtendo-se assim, à frequência da rede elétrica nacional de 50Hz, uma velocidade de sincronismo de 1500 rotações por minuto, pela aplicação da equação 3.1. No entanto, existem motores com um número de pares de pólos diferente. Normalmente, em aplicações que exijam baixas velocidades, o número de pares de pólos é superior.

### 3.2.3 - Entreferro

O entreferro é a região interna da máquina que separa o núcleo estatórico do núcleo rotórico. Este assume-se como um parâmetro essencial em qualquer máquina elétrica rotativa.

Geralmente, à medida que a espessura do entreferro aumenta, as tolerâncias ao nível mecânico das superfícies rotórica e estatórica são menos exigentes, o que se traduz numa redução do custo do motor. No entanto, este aumento do entreferro, vai exigir a aplicação de ímanes permanentes com campos coercivos mais elevados, logo poder-se-á tornar numa

solução mais cara. Há, então, a necessidade de ponderar diversos parâmetros para responder às elevadas exigências atuais do mercado, ao menor custo possível.

### 3.2.4 - Rotor

O desenvolvimento dos motores de ímanes permanentes passa, essencialmente, pela otimização das configurações rotóricas, tendo como objetivo diminuir o peso e o custo do rotor, minimizar o fluxo de fugas entre os ímanes e maximizar a indução magnética no entreferro.

O rotor de um motor síncrono de ímanes permanentes pode assumir diversas configurações consoante o tipo e posicionamento/localização dos ímanes. Normalmente, o seu núcleo é constituído por chapas ferromagnéticas compactadas e isoladas entre si, no qual se encontram ranhuras onde são colocados os ímanes permanentes, e as barras de alumínio que formam a gaiola rotórica. De referir que a maior parte dos motores síncronos de ímanes permanentes apresenta uma estrutura rotórica em que os ímanes são colocados no seu interior. Esta topologia dá origem a um circuito magnético anisotrópico, como acontece nas máquinas síncronas de pólos salientes. Contudo, no caso do motor síncrono de ímanes permanentes, a anisotropia é inversa,  $X_q > X_d$ , devido ao facto do percurso do fluxo magnético segundo o eixo em quadratura (q) se desenvolver num percurso caracterizado por uma relutância menor que a do percurso segundo o eixo direto (d).

Existem, ainda, configurações em que os ímanes são colocados na superfície rotórica do motor. Nestes casos, do ponto de vista magnético, nem sempre existe anisotropia.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de se encontrar uma configuração que permita obter uma maior eficiência energética ao menor custo possível. No seguimento, são apresentadas algumas das configurações rotóricas que são adotadas frequentemente pelos fabricantes.

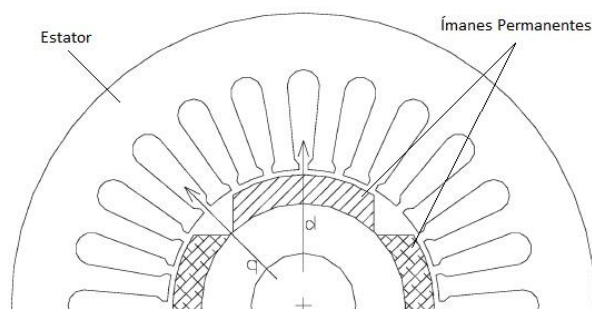
#### 3.2.4.1 - Topologia Periférica

Na topologia periférica, os ímanes permanentes são colocados na periferia do rotor. De seguida são apresentados alguns exemplos de configurações que utilizam esta topologia.

Na configuração rotórica apresentada na figura 3.5, pode verificar-se que os ímanes são colocados na superfície do núcleo rotórico. Esta configuração permite obter uma maior densidade de fluxo no entreferro, contudo, possui uma menor integridade estrutural e menor robustez [21].

O rotor é caracterizado por um núcleo ferromagnético laminado que apresenta simetria circunferencial. Devido a esta simetria, este rotor possui um circuito magnético isotrópico ( $X_d = X_q$ ), como acontece com as máquinas síncronas convencionais de rotor cilíndrico. Assim, em regime síncrono, o binário eletromagnético desenvolvido pelo motor deve-se, em

exclusivo, à interação entre o campo girante produzido pelas correntes induzidas nos enrolamentos do estator e o campo magnético produzido pelos ímanes permanentes [26].



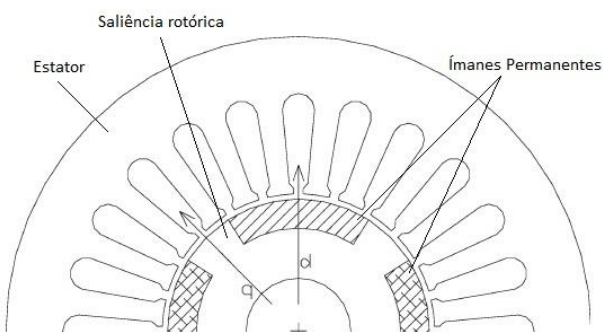
**Figura 3.5** - Configuração rotórica com ímanes dispostos perifericamente [26]

Na figura 3.6, encontra-se representada uma outra configuração em que os ímanes permanentes são colocados na superfície do rotor. Ao invés do que acontece na configuração rotórica anteriormente analisada, nesta configuração existem saliências entre os ímanes. Estas saliências originam uma assimetria circunferencial do campo magnético no entreferro, tornando o circuito anisotrópico do ponto de vista magnético. Assim, estas saliências levam ao aparecimento de uma outra componente de binário como acontece nos motores síncronos de relutância - o binário de relutância.

O quociente entre a reatância  $X_q$  e a reatância  $X_d$ , normalmente designado por razão de anisotropia ( $r$ ), pode ser expressa por

$$r = \frac{X_q}{X_d} \quad (3.2)$$

A razão de anisotropia é uma das características mais importantes para este tipo de motores síncronos, e pode ser particularmente importante em aplicações que necessitem de velocidades de operação superiores à velocidade nominal da máquina [26].



**Figura 3.6** - Configuração rotórica com ímanes dispostos perifericamente entre saliências [26]

Esta configuração possui ímanes permanentes em forma de arco, sendo que estes apresentam uma complexidade superior em termos de fabrico, tornando-os mais caros e elevando, assim, o custo final destas estruturas rotóricas.



### 3.2.4.2 - Topologia Interior

Os avanços tecnológicos resultantes do estudo dos motores síncronos de ímanes permanentes de topologia interior têm recebido uma enorme atenção na indústria, devido à sua eficiência superior, comparativamente com outras topologias, e à elevada densidade de potência, tornando estes motores numa excelente opção em diversas aplicações, principalmente naquelas em que velocidade de operação variável é necessária [27].

Na topologia interior, os ímanes permanentes são colocados no interior do rotor. As configurações com esta topologia, a par da configuração vista anteriormente, devido à assimetria circunferencial rotórica, originam um circuito magnético anisotrópico.

Na configuração da figura 3.7, é possível verificar que os ímanes permanentes se encontram no interior do rotor. É caracterizada por ser uma configuração de baixo custo devido à possibilidade de se poder aplicar blocos de ímanes permanentes de formato retangular que, naturalmente, são mais baratos que aqueles em forma de arco, muito utilizados nas configurações de topologia periférica, como se viu anteriormente. Outra razão para o menor custo apresentado por esta configuração prende-se com a utilização de uma única camada de material magnético permanente.

O seu processo de montagem é relativamente simples, quando comparado com outras configurações.

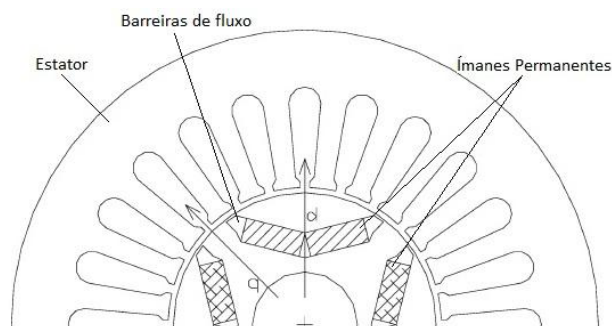
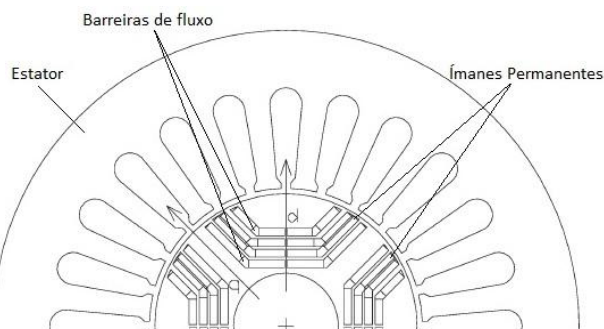


Figura 3.7 - Configuração rotórica com ímanes dispostos interiormente - camada simples [26]

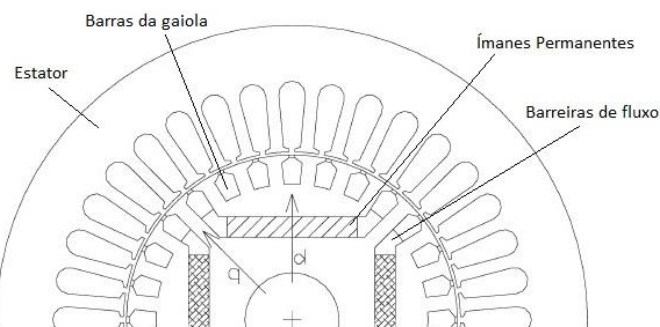
Na figura 3.8 encontra-se representada uma outra configuração de topologia interior bastante utilizada. Esta distingue-se da configuração apresentada na figura 3.7 pelo facto de apresentar uma disposição dos ímanes permanentes e das barreiras de fluxo em múltiplas camadas. Esta configuração é caracterizada por uma razão de anisotropia superior quando comparada com a configuração de camada simples vista anteriormente, apresentando assim um binário relutante também superior.



**Figura 3.8** - Configuração rotórica com ímanes dispostos interiormente - múltiplas camadas [26]

Em termos de processo de montagem, esta configuração torna-se bastante complexa, se construída a partir de blocos de ímanes permanentes. Uma alternativa é a montagem por compressão ou injeção de moldes de material magnético permanente nas ranhuras presentes no rotor para o efeito.

Uma das configurações rotóricas mais utilizadas é apresentada na figura 3.9. A par das configurações vistas anteriormente, os ímanes permanentes são colocados no interior da estrutura rotórica, apresentando uma disposição em camada única. A grande particularidade presente nesta configuração traduz-se na presença de uma gaiola rotórica, normalmente constituída por barras condutoras de alumínio. A gaiola confere à máquina características de arranque assíncrono, quando funciona como motor, de amortecimento de oscilações em torno da velocidade síncrona, e protege os ímanes contra o campo desmagnetizante de reação da armadura, em situações de funcionamento assíncrono.



**Figura 3.9** - Configuração rotórica com ímanes dispostos interiormente - camada simples com gaiola [26]

Nas configurações de topologia interior é comum a aplicação de barreiras de fluxo devido à necessidade de isolamento magnético nas proximidades da superfície rotórica para minimizar a dispersão do fluxo entre pólos adjacentes e maximizar o fluxo que atravessa o entreferro [14].

Os ímanes permanentes, quando colocados interiormente na estrutura do rotor, encontram-se muito bem protegidos contra forças centrífugas, tornando esta configuração ótima para motores que necessitem de operar a velocidades angulares muito elevadas.

Nas aplicações que necessitam de velocidade variável, o controlo de velocidade é feito na zona de binário máximo disponível, com o aumento da tensão aplicada proporcionalmente à velocidade de rotação. Para o funcionamento a uma velocidade superior àquela estipulada para o motor, há a necessidade deste passar a funcionar na zona de enfraquecimento do campo. Neste caso, como o fluxo magnético produzido pelos ímanes permanentes é constante, a redução do fluxo no entreferro é obtida atuando na componente longitudinal da corrente no estator,  $i_d$ .

No caso dos motores de topologia periférica em que não existe anisotropia magnética, ou em que esta é muito baixa, este tipo de controlo é de difícil implementação, visto que quanto maior for a velocidade para lá do seu valor estipulado, maior terá de ser corrente  $i_d$  no estator de forma a criar-se uma oposição ao fluxo magnético constante criado pelos ímanes, enfraquecendo-se assim o campo no entreferro. Como resultado, a corrente total estatórica aumenta de forma não proporcional ao aumento da potência de saída, atingindo-se rapidamente o valor de corrente máxima admissível, que determinará a velocidade máxima de operação.

No caso dos motores de topologia interior, o binário desenvolvido apresenta uma componente de binário extra - o binário de relutância. Daqui resulta uma vantagem importante para a implementação deste tipo de controlo, visto que a componente longitudinal da corrente no estator necessária para se opor ao fluxo magnético a altas velocidades será menor.

Visto que os motores síncronos de ímanes permanentes são muito utilizados em aplicações de baixa/média potência de velocidade variável, diversos estudos científicos têm surgido no sentido de se melhorar a sua eficiência energética, otimizando os seus componentes de forma a diminuir o nível de perdas.

O principal ponto de focagem tem sido a otimização rotórica, como acontece no estudo realizado em [31] que sugere a utilização de um método iterativo automático de otimização, para se conseguir determinar pontos de melhoria no formato dos ímanes e do núcleo rotórico, com o objetivo de reduzir as perdas magnéticas a elevadas velocidades sob controlo de enfraquecimento de campo. A estrutura rotórica referente a este trabalho de investigação pode ser visualizada na figura 3.10 (a). Contudo, este estudo foca-se, apenas, na redução de perdas magnéticas a elevadas velocidades de funcionamento, surgindo posteriormente novos estudos que contemplam também a redução de perdas para baixas velocidades, como acontece no estudo desenvolvido em [32].

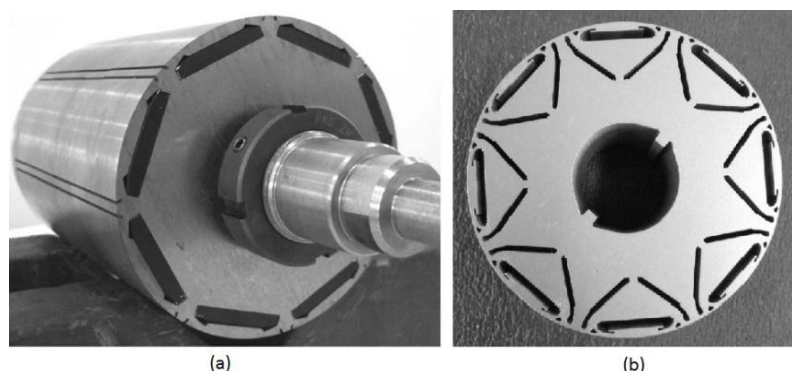


Figura 3.10 - Evolução da estrutura rotórica [31,33]

Em [33] e no seguimento do trabalho desenvolvido em [32], tendo em vista a utilização de motores síncronos de ímanes permanentes de topologia interior numa gama de velocidades muito alargada, surge um estudo que explica como melhorar a configuração rotórica proposta no primeiro trabalho, para se conseguir reduzir ainda mais o nível de perdas magnéticas mantendo-se o binário máximo, obtendo-se a estrutura rotórica demonstrada na figura 3.10 (b). Após a investigação realizada neste estudo, os autores concluíram que as perdas magnéticas sofreram uma redução superior a 20% com um decréscimo de apenas 4% no valor do binário máximo, comparativamente com o estudo realizado em [32].

Em jeito de conclusão, a configuração rotórica de topologia interior apresenta diversas vantagens como visto anteriormente, permitindo obter-se motores de eficiência muito elevada que, a par dos últimos desenvolvimentos científicos, tornarão estes motores cada vez mais fiáveis, robustos e baratos.

### 3.3 - Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes é semelhante ao do motor síncrono eletroexcitado, sendo que a grande diferença surge pelo facto da força magnetomotriz do circuito indutor da máquina tomar sempre o mesmo valor, pois os ímanes permanentes apresentam sempre a mesma indução magnética ao longo do tempo de vida útil do motor<sup>1</sup>. Assim, com a substituição do tradicional enrolamento de excitação pelos ímanes permanentes, ganha-se em robustez e eficiência mas, por outro lado, surge a impossibilidade de controlo do fator de potência, limitando a utilização desta máquina no funcionamento como gerador. No entanto, o desenvolvimento de conversores de frequência com a evolução da electrónica de potência, veio solucionar esta limitação.

---

<sup>1</sup> Esta propriedade altera-se ligeiramente com a temperatura de funcionamento, como decorre da influência desta variável nas características dos ímanes permanentes descrita no capítulo anterior.

Normalmente, este motor possui um estator formado por um enrolamento trifásico que, estando ligado à rede, em condições normais, será percorrido por um sistema trifásico de correntes simétricas. Surge assim um campo magnético girante no entreferro que roda em pleno sincronismo com a frequência das correntes que circulam no induzido, o campo magnético de reação do induzido. Assim, como demonstrado anteriormente, à velocidade do campo magnético girante criado pelas correntes induzidas no estator, chama-se de velocidade de sincronismo ou velocidade síncrona.

Em regime permanente, ou seja, quando o rotor se encontra a rodar à velocidade de sincronismo, devido à presença dos ímanes permanentes que criam um sistema magnético polar com  $p$  pares de pólos (comumente 2 pares de pólos), é criado um campo magnético girante de excitação, o campo magnético principal da máquina. Consequentemente, por efeito da interação entre o campo magnético indutor e o campo magnético de reação do induzido surge um binário eletromagnético.

Da interação do campo magnético principal criado pelo rotor e do campo magnético de reação do induzido criado pelas correntes induzidas no estator surge um campo magnético resultante, que também roda à velocidade de sincronismo,  $n_s$ . A reação do induzido é magnetizante quando os seus efeitos são aditivos aos do campo indutor, e desmagnetizante quando os seus efeitos se opõem aos do campo indutor.

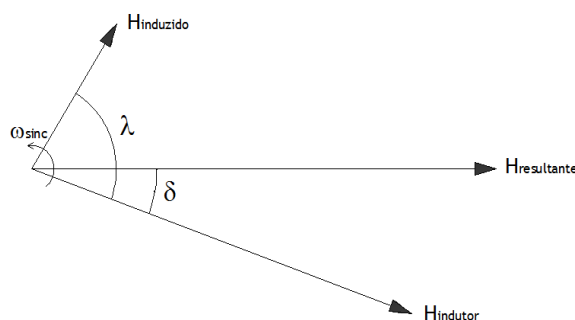
No funcionamento como motor, para um fator de potência indutivo, a reação do induzido é magnetizante, situação que se verifica com o motor utilizado no estudo experimental referente a este trabalho. Quanto maior for a corrente que circula no induzido maior será a força magnetomotriz que caracteriza este campo magnetizante.

### 3.3.1 - Ângulo de Binário

Como mostrado anteriormente, um sistema trifásico de correntes simétricas aplicado no induzido produzirá um campo magnético girante de reação do induzido,  $H_{\text{induzido}}$ . Existem, assim, dois campos magnéticos presentes na máquina, sendo que o campo magnético girante produzido pelo rotor, ou seja, o campo magnético indutor,  $H_{\text{indutor}}$ , irá tentar constantemente alinhar-se com o campo magnético do induzido,  $H_{\text{induzido}}$ . No entanto, estes dois campos magnéticos nunca ficam perfeitamente alinhados, pois mesmo sem carga acionada pelo veio, o rotor possui um binário resistente de perdas mecânicas, proporcionando um desfasamento entre os dois campos, embora rodando à mesma velocidade. Este desfasamento corresponde ao ângulo de binário, que é tanto maior quanto maior for o binário resistente oferecido pela carga. Portanto, como consequência da interação do campo magnético resultante no estator e do campo magnético indutor, desenvolve-se um binário eletromagnético motor. Este binário depende dos campos magnéticos do estator e do rotor, e do ângulo que formam entre si:

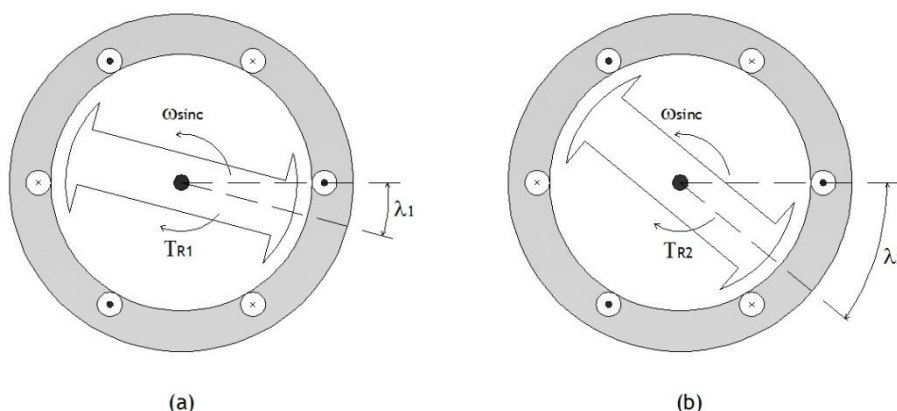
$$T_e = k \cdot H_{\text{induzido}} \cdot H_{\text{indutor}} \cdot \sin \lambda \quad (3.3)$$

A partir da equação 3.3 é possível obter-se um diagrama que traduz, magneticamente, o funcionamento do motor síncrono trifásico. Este diagrama encontra-se representado na figura 3.11, que traduz o funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes subexcitado.



**Figura 3.11** - Diagrama fasorial magnético do motor síncrono trifásico

Na figura seguinte encontra-se representado esquematicamente o desfasamento entre os campos magnéticos do estator e do rotor para duas situações distintas de carga. Assim, na figura 3.12 (a), encontra-se representado um motor a acionar uma carga que oferece um determinado binário resistente,  $T_{R1}$ , originando um desfasamento de  $\lambda_1$  entre os campos magnéticos, que originará um binário motor  $T_{e1}$ . Por seu turno, na figura 3.12 (b), pode-se verificar que o desfasamento é de  $\lambda_2$ , superior a  $\lambda_1$ . Este aumento do ângulo de binário deve-se a um aumento do binário resistente por parte da carga acionada pelo motor ( $T_{R2} > T_{R1}$ ), originando, assim, um aumento do binário motor. Conclui-se, assim, que ao aumentar o desfasamento entre os campos magnéticos indutor e de reação do induzido, aumenta-se também o binário motor desenvolvido. Este binário pode ser aumentado até um determinado limite - limite de estabilidade estática - no qual se garantem as condições de sincronismo.



**Figura 3.12** - Ângulo de binário

O ângulo de binário, do ponto de vista qualitativo, permite expor a reação magnetizante do induzido, se  $\lambda < 90^\circ$ , e a reação do induzido desmagnetizante, se  $\lambda > 90^\circ$ .

### 3.3.2 - Diagrama Fasorial

O princípio de funcionamento base de um motor síncrono é praticamente igual ao do gerador síncrono, com a diferença de que o trânsito de potência tem sentido inverso. Estando o trânsito de potência invertido, será expectável que a corrente que circula no induzido também tenha sentido oposto. Assim, a equação elétrica que traduz o funcionamento do motor síncrono trifásico, em regime permanente simétrico e síncrono, desprezando a anisotropia, pode ser definida por:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + (R_s + jX_s)\underline{I} \quad (3.4)$$

Onde

$\underline{U}$  é a tensão aos terminais do induzido

$\underline{E}_0$  é a força eletromotriz

$R_s \cdot \underline{I}$  é a queda de tensão na resistência do induzido

$jX_s \cdot \underline{I}$  é a queda de tensão na reactância síncrona.

Uma forma de caracterizar o funcionamento do motor síncrono é através de um diagrama fasorial, que traduz a interrelação dos fasores da equação 3.4. O respetivo diagrama encontra-se na figura 3.13.

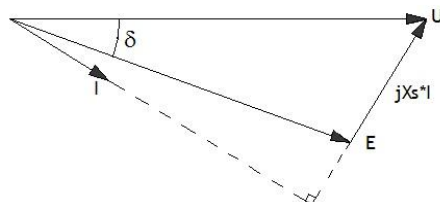


Figura 3.13 - Diagrama fasorial elétrico do motor síncrono trifásico

No entanto, como referenciado anteriormente, a maior parte dos motores síncronos de ímanes permanentes apresenta anisotropia magnética, não considerada até aqui, implicando que a reatância síncrona seja caracterizada por uma componente segundo o eixo longitudinal  $X_d$  e outra segundo o eixo transversal  $X_q$ . Esta premissa leva a um diagrama fasorial um pouco mais complexo, que não será aqui revelado, onde é evidenciada a influência das quedas de tensão nas reatâncias síncronas longitudinal,  $jX_d \underline{I}$ , e transversal,  $jX_q \underline{I}$ , que compõe o circuito do induzido.

Ao desfasamento entre a tensão aos terminais,  $\underline{U}$ , e a força eletromotriz,  $\underline{E}$ , denomina-se de ângulo de carga,  $\delta$ . Este desfasamento corresponde à variação da posição rotórica (medida num referencial móvel à velocidade de sincronismo) quando a máquina síncrona passa da situação de funcionamento em vazio, caracterizada por  $\underline{U} \equiv \underline{E}_0$ , para a de funcionamento em carga.

### 3.3.3 - Anisotropia Magnética

Até aqui, o estudo realizado sobre o princípio de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes foi feito considerando que não existe anisotropia magnética no entreferro da máquina, ou seja, que a relutância magnética no entreferro não varia com a posição do rotor e, conseqüentemente, a reactância síncrona  $X_s$  é constante. Isto acontece, por exemplo, nas máquinas síncronas convencionais de rotor cilíndrico e nas máquinas síncronas de ímanes permanentes de topologia periférica já apresentada anteriormente.

No entanto, a maior parte dos motores síncronos de ímanes permanentes possui anisotropia magnética. A componente fundamental do fluxo magnético do campo girante de reação do induzido varia com a posição do rotor, devido à variação da relutância magnética no entreferro provocada pela assimetria circunferencial do circuito magnético da estrutura rotórica. Na figura 3.14, encontra-se representada a estrutura de um motor síncrono de ímanes permanentes (2 pares de pólos), com uma das configurações rotóricas mais utilizadas. Na figura encontram-se representados os eixos do referencial  $dq$  que roda à velocidade de sincronismo, em regime síncrono. Da análise, conclui-se que a relutância é mínima quando a força magnetomotriz do estator coincide com o eixo transversal ( $q$ ), sendo o fluxo máximo e, conseqüentemente, a reactância do induzido é máxima também. Por outro lado, quando a força magnetomotriz estatórica coincide com o eixo longitudinal ( $d$ ), devido à baixa permeabilidade magnética dos ímanes, a relutância é máxima, sendo o fluxo mínimo e, conseqüentemente, a reactância do induzido é mínima.

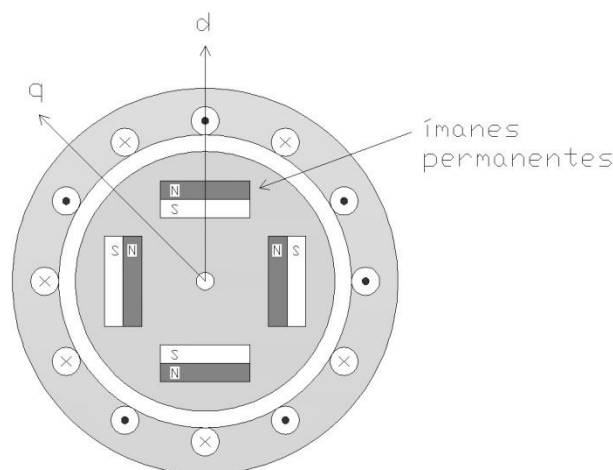


Figura 3.14 - Eixo longitudinal e transversal no rotor

Do exposto, conclui-se que o circuito magnético da máquina síncrona de ímanes permanentes apresenta anisotropia inversa, quando comparado com a máquina síncrona convencional de pólos salientes. Pois, neste caso, a reactância síncrona transversal,  $X_q$ , é superior à reactância síncrona longitudinal,  $X_d$ . Logo, a razão de anisotropia,  $r$ , será



caracterizada por um valor superior à unidade, sendo tanto maior quanto menor for a permeabilidade magnética apresentada pelos ímanes permanentes e, portanto, segundo o eixo longitudinal.

A equação elétrica que traduz o funcionamento do motor síncrono trifásico com um circuito magnético anisotrópico, em regime permanente simétrico e síncrono, pode ser definida pelo método de Blondel por:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + R\underline{I} + jX_d I_d + jX_q I_q \quad (3.5)$$

onde

$\underline{U}$  é a tensão aos terminais do induzido

$\underline{E}_0$  é a força eletromotriz

$R_s \cdot \underline{I}$  é a queda de tensão na resistência do induzido

$jX_d I_d$  é a queda de tensão na reatância síncrona longitudinal

$jX_q I_q$  é a queda de tensão na reatância síncrona transversal

Com a decomposição da força magnetomotriz produzida pelo estator nas suas componentes longitudinal e transversal, o modelo de Blondel, através da teoria das duas reações, para a máquina síncrona convencional, põe em relevo uma interpretação física do fenómeno de reação do induzido, que é a seguinte: parte da reação do induzido (componente longitudinal) serve para sobreexcitar ou desexcitar o circuito magnético principal da máquina, enquanto a outra parcela (componente transversal) é a responsável pela criação de binário motor [14]. Naturalmente, isto é válido para a máquina síncrona convencional. Para a máquina síncrona de ímanes permanentes, que apresenta anisotropia inversa, os parâmetros dependentes do circuito magnético segundo o eixo longitudinal são praticamente constantes, enquanto, que segundo o eixo transversal são variáveis.

### 3.4 - Características de Funcionamento

A utilização da máquina de ímanes permanentes como motor tem vindo a ser estimulada pelo aumento das potências disponíveis, através da melhoria das características dos materiais magnéticos e por uma seleção adequada dos parâmetros da máquina.

A maioria das máquinas síncronas de ímanes permanentes apresenta uma topologia rotórica em que os ímanes se encontram embutidos nesta. Isto conduz a um circuito magnético anisotrópico que, associado a uma seleção apropriada dos parâmetros da máquina, pode oferecer vantagens nas suas características de funcionamento.

Uma das características mais importantes de um motor síncrono é a sua característica de binário em função do ângulo de carga,  $T=f(\delta)$ . O binário eletromagnético desenvolvido pelo

motor síncrono de ímanes permanentes é determinado pela potência disponível no entreferro e pela velocidade angular síncrona.

Da análise realizada a partir do Modelo de Blondel simplificado, obtém-se a potência eletromagnética por fase para o motor síncrono de ímanes permanentes. Esta potência eletromagnética,  $P_f$ , pode ser expressa por:

$$P_f = \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (3.6)$$

Convém salientar que a potência ativa absorvida pela máquina foi considerada como potência elétrica integralmente transformada, pois as perdas por efeito de Joule nos circuitos do induzido da máquina foram desprezadas.

Da expressão 3.6, obtém-se o binário eletromagnético desenvolvido pela máquina,  $T_e$ , em regime permanente sinusoidal, para o motor síncrono trifásico de ímanes permanentes através da seguinte expressão

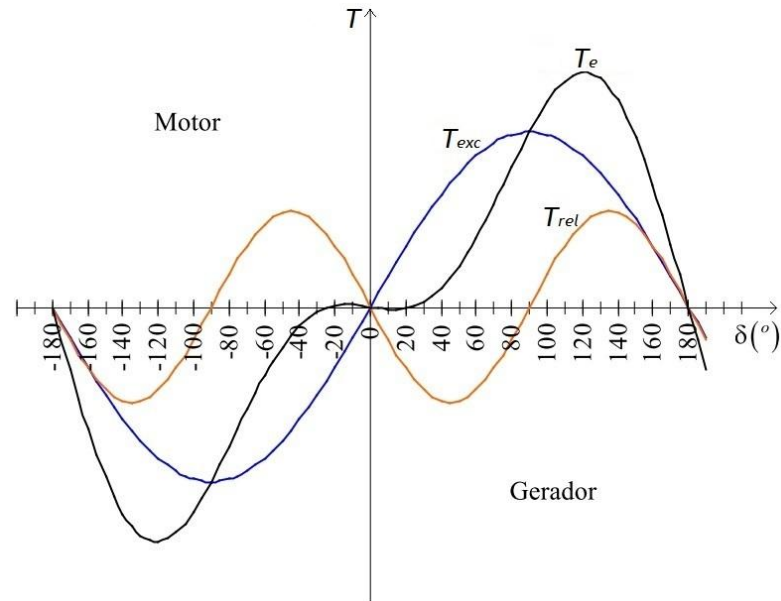
$$T_e = \frac{3}{2\pi n_s} \left[ \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right] \quad (3.7)$$

Analisando a expressão 3.7, podem ser detetadas duas componentes de binário. São elas:

- Binário de excitação,  $T_{exc}$ , que resulta da interação do campo magnético indutor com o campo magnético de reação do induzido;
- Binário de relutância,  $T_{rel}$ , que resulta da anisotropia magnética do circuito magnético da máquina síncrona de ímanes permanentes.

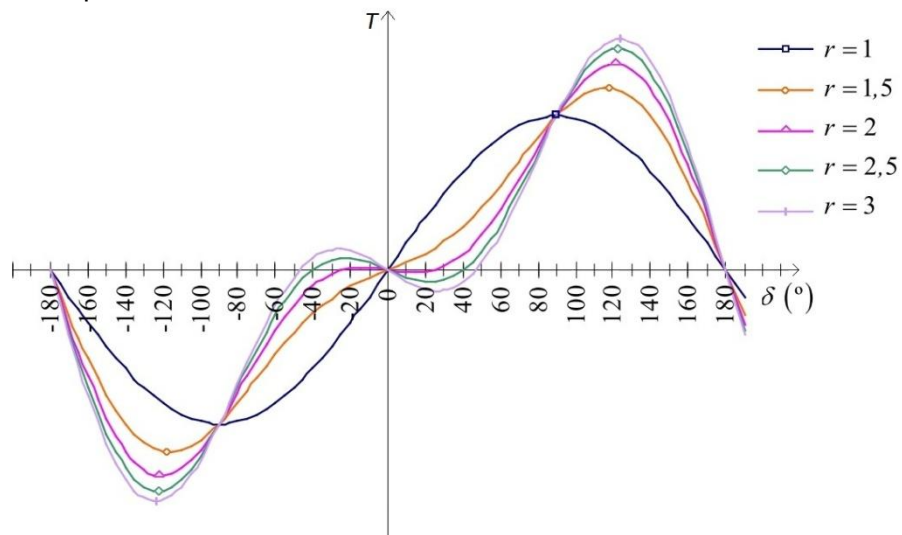
Assim, se a máquina apresentar um circuito magnético isotrópico, apenas a componente de binário de excitação,  $T_{exc}$ , estará presente. Neste caso, o binário desenvolvido apresenta uma variação sinusoidal e atinge o seu valor máximo para um ângulo de carga igual a  $90^\circ$  [36].

No entanto, a máquina síncrona de ímanes permanentes apresenta anisotropia magnética, levando ao aparecimento da componente de binário de relutância,  $T_{rel}$ . Para estas máquinas, e no caso mais comum de anisotropia inversa, o binário resultante,  $T_e$ , atinge o seu valor máximo para ângulos de carga superiores a  $90^\circ$ . Como se pode ver na figura 3.15, para ângulos de carga superiores a  $90^\circ$ , a componente de binário de relutância,  $T_{rel}$ , é aditiva.



**Figura 3.15** - Evolução das componentes de binário de uma máquina de ímanes permanentes com anisotropia inversa [14]

Decorre do anterior que, a razão de anisotropia representa uma característica muito importante aquando do projeto da máquina. A sua importância evidencia-se pela influência que esta característica tem na potência e binário desenvolvidos. Na figura 3.16, é possível observar-se a influência desta no binário desenvolvido. Assim, para  $r=1$ , a reatância  $X_d$  é igual à reatância  $X_q$ , logo o binário desenvolvido não vem afetado da componente de relutância. À medida que se vai aumentando a razão de anisotropia, ou seja, à medida que o valor da reatância  $X_q$  vai aumentando face ao valor da reatância  $X_d$ , consegue-se aumentar também o binário máximo disponível.



**Figura 3.16** - Influência da razão de anisotropia no binário eletromagnético desenvolvido por uma máquina síncrona de ímanes permanentes [14]

Quanto a outras importantes características de funcionamento de um motor síncrono de ímanes permanentes, pela análise do gráfico da figura 3.17, é possível concluir que a potência elétrica absorvida,  $P_{abs}$ , a corrente absorvida,  $I_{abs}$ , e o binário motor desenvolvido,

$T$ , aumentam com o aumento do fator de carga. O rendimento,  $\eta$ , também vai aumentando, atingindo o seu máximo normalmente entre os 75% e 100% da carga, isto é, quando se dá a igualdade entre as perdas Joule e as perdas não Joule. Para o motor síncrono de ímanes permanentes testado neste estudo, poderá verificar-se no próximo capítulo que o rendimento é máximo quando o motor trabalha em torno da plena carga.

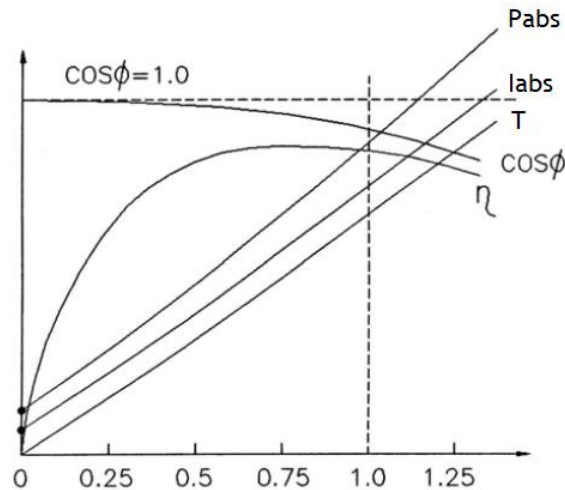


Figura 3.17 - Características de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes [1]

Por fim, salienta-se o facto do fator de potência,  $\cos \phi$ , ser unitário até aproximadamente 50% da carga, começando a decrescer ligeiramente a partir daqui com o aumento da carga. Isto, permite concluir que a energia magnética fornecida pelos ímanes do motor, para baixos fatores de carga, é suficiente para alimentar o campo magnético necessário à conversão eletromagnética, não consumindo energia reativa da rede. No entanto, como se verá no capítulo seguinte, o fator de potência do motor testado é bastante baixo para baixos regimes de carga.

### 3.5 - Arranque de Motores Síncronos de Ímanes Permanentes

Um motor síncrono de ímanes permanentes, devido à inércia do rotor e ao binário resistente oferecido pela carga, à frequência da rede, não é capaz de arrancar e alcançar a velocidade de sincronismo. Para o rotor atingir esta velocidade, existe a necessidade de se recorrer a um sistema auxiliar de arranque.

De seguida apresentam-se os métodos utilizados no arranque:

- Arranque assíncrono
- Arranque síncrono
- Arranque com motor auxiliar

### 3.5.1 - Arranque Assíncrono

O arranque assíncrono é o principal método utilizado para o arranque de motores síncronos de ímanes permanentes de baixa/média potência. Na literatura anglo-saxónica, estes motores que promovem arranque assíncrono são conhecidos como '*line-start permanent magnet synchronous motors*'. São motores caracterizados pelo seu rotor possuir uma gaiola, permitindo a realização de um arranque direto. No entanto, a utilização de um conversor de frequência será necessária no caso de se querer variar a velocidade de operação.

Para se produzir um binário de arranque assíncrono, o rotor necessita de estar equipado com uma gaiola como acontece nos motores de indução. Esta gaiola, para além de possibilitar o arranque do motor, também é eficaz no amortecimento das oscilações no modo de funcionamento síncrono, garantindo estabilidade na velocidade perante variações bruscas de carga.

As barras da gaiola nos motores do tipo '*line start*', normalmente, não se encontram inclinadas como acontece na gaiola dos motores de indução, pois a disposição dos ímanes permanentes axialmente embebidos no núcleo rotórico, não o permite. Como consequência, surge uma maior distorção harmónica no binário durante a fase inicial do arranque em comparação com os motores de indução. Outra desvantagem, surge do facto dos ímanes permanentes, durante o arranque, produzirem um binário resistente que diminui o binário de arranque, reduzindo assim a performance para o rotor atingir o sincronismo.

A figura 3.18 representa a característica mecânica de binário, na fase de arranque, de um motor síncrono de ímanes permanentes do tipo '*line start*' com 2 pares de pólos e 7,5kW de potência nominal [29].

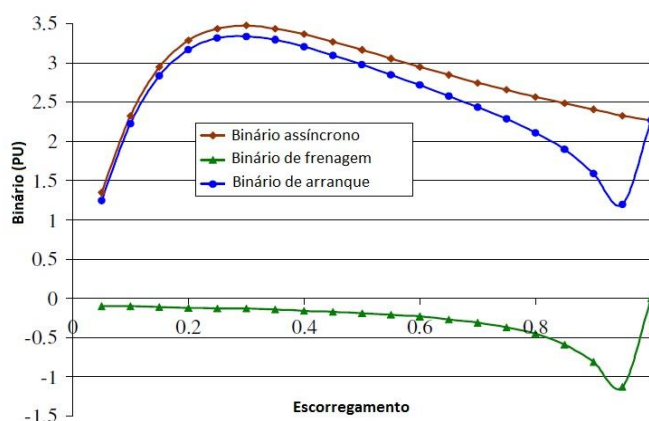


Figura 3.18 - Característica mecânica de binário durante o arranque -  $T=f(s)$  [29]

Durante a fase de arranque, o binário de arranque  $T_{arr}$  é constituído pelo binário assíncrono  $T_{ass}$  originado pela presença da gaiola, pelo binário de frenagem  $T_f$  originado pela reação do induzido devida à presença dos ímanes permanentes e pelo binário relutante  $T_{rel}$  originado pela diferente relutância nos eixos longitudinal  $d$  e transversal  $q$ .

Sendo que, normalmente, o binário relutante no arranque pode ser desprezado, o binário de arranque será dado por:

$$T_{arr} = T_{ass} + T_f \quad (3.8)$$

Para a criação do binário de arranque  $T_{arr}$ , contribui principalmente a componente de binário assíncrono. Nas barras curto-circuitadas por anéis na gaiola circularão correntes elétricas devidas às forças eletromotrizes induzidas pelo campo girante. Para este binário, contribuem ainda as correntes de Foucault e as correntes devidas à reação do induzido, embora com menor significado.

Após a ocorrência do arranque assíncrono, a velocidade de rotação do rotor do motor terá sido elevada até um valor próximo da velocidade de sincronismo. Nesta fase será necessário proceder-se ao sincronismo, que ocorre quando o binário síncrono e o binário assíncrono somados atingem o valor máximo. O binário síncrono tem uma variação alternada com valor médio nulo até à sincronização, não contribuindo para a aproximação da velocidade síncrona, mas sendo necessário para a sincronização e posterior funcionamento em regime permanente.

A gaiola rotórica, para além de permitir a criação do binário assíncrono, proporciona uma maior estabilidade no funcionamento do motor em regime permanente. Quando o rotor se encontra a rodar à velocidade de sincronismo, as tensões induzidas nas barras da gaiola serão nulas, não contribuindo desta forma para o binário motor. No entanto, se a velocidade rotórica sofrer uma oscilação em torno da velocidade síncrona, irão ser induzidas forças eletromotrizes nas barras condutoras da gaiola, que produzirão um fluxo de corrente nas mesmas que, por sua vez, originarão um campo magnético responsável pela criação de um binário que tende a colocar novamente o rotor a rodar à velocidade de sincronismo.

A gaiola funciona assim como um amortecedor a oscilações que ocorram devido à variações bruscas da carga ou a transitórios que ocorram em regime permanente. Por esta razão, muitas vezes, se atribui, às barras ou enrolamentos que constituem a gaiola, o nome de barras ou enrolamentos amortecedores, com ação equivalente aos amortecedores *Leblanc*, clássicos nas máquinas síncronas convencionais.

O arranque assíncrono pode ser realizado através de ligação direta à rede elétrica, não sendo necessária a utilização de conversores eletrónicos. No entanto, tal método será de evitar devido às sobreintensidades e esforços mecânicos que podem atingir níveis elevados durante o arranque. Uma alternativa será a utilização de um autotransformador. Neste caso, a tensão será aumentada desde um valor nulo até à tensão nominal, permitindo obter um arranque rápido e com esforços menores para a máquina.

### 3.5.2 - Arranque Síncrono

O arranque síncrono é realizado recorrendo à utilização de um conversor de frequência. Se o motor síncrono de ímanes permanentes não possuir gaiola rotórica, quando ligado diretamente à rede não terá a capacidade de desenvolver um binário assíncrono como acontece nos motores do tipo '*line start*', pelo que não arranca. Assim, para os motores que não possuem gaiola rotórica, a utilização de um conversor de frequência é necessária, tanto para se realizar o arranque como para se proceder à variação da velocidade.

Se o campo girante no entreferro rodar a uma velocidade suficientemente baixa, o rotor não terá problema em acelerar e acompanhar a velocidade de sincronismo imposta pela frequência de alimentação. Após o rotor começar a girar, a velocidade do campo girante pode ser aumentada de forma gradual, aumentando a frequência de alimentação até ao seu valor nominal, 50Hz no caso de Portugal.

Quando um motor síncrono é operado a velocidades inferiores à velocidade nominal, a tensão aplicada aos seus terminais deve variar linearmente com a frequência aplicada, isto é, o quociente  $U/f$  deve ser mantido, de forma a evitar saturação excessiva no circuito magnético e sobreintensidades nos enrolamentos do estator. Ao mesmo tempo, preserva-se o binário máximo desenvolvido pelo motor.

### 3.5.3 - Arranque com Motor Auxiliar

O arranque com motor auxiliar, como o próprio nome indica, é efetuado através do acoplamento entre os veios de um motor auxiliar e do próprio motor síncrono que se deseja arrancar. O motor auxiliar que, por exemplo, pode ser um motor assíncrono, tem assim a missão de elevar a velocidade do motor síncrono para lá da velocidade síncrona. Quando esta for ultrapassada, pode ser realizado o paralelo do motor síncrono com a rede a que este se encontra ligado, e o motor auxiliar pode ser desacoplado. Assim que o motor auxiliar for desligado, a velocidade do rotor diminuirá até este atingir a velocidade síncrona, começando a operar como motor. Quando o paralelo com a rede tiver sido efetuado, a carga pode ser acoplada ao veio do motor síncrono.

Este método é atualmente pouco utilizado, tendo alguma aplicação no arranque de grandes motores. Os conversores eletrónicos revolucionaram este campo, pois possuem diversas vantagens face ao motor auxiliar. O seu baixo preço, manutenção praticamente inexistente e a possibilidade de controlo da velocidade permitem colocar o motor a funcionar numa gama de velocidades muito grande.

No caso dos motores síncronos de ímanes permanentes, é comum os fabricantes lançarem para o mercado uma solução composta pelo motor e por um conversor de frequência, dando a oportunidade ao utilizador de colocar o motor a trabalhar à velocidade desejada dentro da gama para a qual foi projetado.

### 3.6 - Análise Comparativa com outros Motores Elétricos

Os motores elétricos são amplamente utilizados em todos os setores industriais para converter energia elétrica em energia mecânica. Neste sentido, e tendo em conta o contexto da atual política energética centrada na poupança e no uso racional da energia, os fabricantes têm desenvolvido motores cada vez mais eficientes com o objetivo de estes permanecerem em conformidade com as normas eletrotécnicas vigentes.

Como já foi dito, os motores de indução representam a maior parte dos motores elétricos em funcionamento, devido às suas características de elevada fiabilidade e baixa manutenção a um custo acessível. Trata-se de motores que se encontram num estado de maturação muito avançado, pelo que investigadores e fabricantes já os exploraram ao máximo. Sendo assim, um aumento da sua eficiência energética, pode implicar um aumento do custo final, imputando aos fabricantes a necessidade de se focarem em alternativas economicamente viáveis.

Os motores síncronos têm sido alvo de diversos estudos científicos, e vários fabricantes têm apostado neste segmento para obterem motores com altos índices de eficiência energética. A máquina síncrona convencional desde sempre teve pouca expressão na utilização como motor, devido às desvantagens apresentadas face ao motor de indução. No entanto, recentemente, têm surgido no mercado motores síncronos capazes de superarem largamente os níveis de eficiência energética dos motores de indução a um preço competitivo - os motores síncronos de ímanes permanentes. Outros fabricantes, têm também apostado no segmento dos motores síncronos de relutância.

No seguimento, é efetuado um estudo comparativo do motor síncrono de ímanes permanentes com as diversas soluções concorrentes.

#### 3.6.1 - Motor Síncrono de Ímanes Permanentes vs Motor de Indução

O motor de indução foi, durante muitos anos, a solução preferencial para utilização em acionamentos eletromecânicos de baixa/média potência devido à sua elevada robustez e fiabilidade, manutenção reduzida e um preço relativamente baixo.

No entanto, com a atualização de normas regulamentares, como a IEC60034-30 (África, parte da América do Sul, parte da Ásia e Europa) ou a NEMA Premium (Estados Unidos da América e Canadá), que regulam os níveis de eficiência energética em máquinas elétricas, novos motores mais eficientes têm sido alvo de estudo e desenvolvimento.

Segundo a norma IEC60034-30, a eficiência energética nos motores de indução pode ser classificada por três índices: IE1 (eficiência *standard*), IE2 (eficiência elevada) e IE3 (eficiência *premium*). No entanto, recentemente, a Comissão Eletrotécnica Internacional atualizou esta norma (IEC60034-31), adicionando-lhe um novo nível de eficiência superior - IE4 (eficiência *super premium*) [30].



A recente norma IEC 60034-31 recomenda que as perdas, para um motor atingir o nível de eficiência IE4, devem ser reduzidas entre 10% a 15% comparativamente com aquelas especificadas no nível IE3. Assim, para se conseguir uma redução significativa destas num motor de indução, por si só já tão explorado, será necessário utilizar condutores de cobre de secção superior, as lâminas que constituem o núcleo ferromagnético devem ser otimizadas e, eventualmente, a utilização de gaiolas em cobre fundido deve ser ponderada [29].

Estas alterações podem levar o motor de indução a atingir o nível de eficiência IE4, no entanto, maiores carcaças serão necessárias devido ao aumento do material ativo utilizado, o que implicará um aumento do custo total da máquina.

Uma alternativa viável que consegue atingir o nível de eficiência IE4 especificado na norma IEC60034-31 e, até mesmo superá-lo, é o motor síncrono de ímanes permanentes. Diversos fabricantes têm lançado no mercado motores síncronos de ímanes permanentes do tipo '*line-start*' que são caracterizados por um elevado rendimento e fator de potência, elevada robustez, fiabilidade e manutenção reduzida a um preço capaz de competir com o motor de indução.

Comparativamente com o motor de indução, o motor síncrono de ímanes permanentes apresenta um tamanho mais reduzido. A sua estrutura rotórica não inclui enrolamento indutor, pelo que as perdas de Joule são nulas. A natureza síncrona da máquina também faz com que as correntes na gaiola rotórica, quando existe, sejam nulas, ou seja, a presença desta gaiola não afeta o rendimento em regime estacionário. Pode apresentar uma distância no entreferro superior, tornando-o num motor mais fiável. Um aumento do entreferro minimiza o efeito de reação da armadura, reduzindo assim a reatância síncrona (se necessário) e aumentando a estabilidade.

A velocidade é constante, independentemente do binário de carga. Em condições de alimentação com frequência constante e ignorando o efeito de anisotropia, o binário motor é diretamente proporcional à tensão de alimentação. Nos motores de indução, a velocidade diminui à medida que o binário de carga aumenta, sendo o binário motor diretamente proporcional ao quadrado da tensão de alimentação. Isto significa que uma pequena oscilação na tensão de entrada implica uma maior variação do binário motor, contribuindo para uma maior instabilidade.

No que ao fator de potência e rendimento diz respeito, o motor síncrono de ímanes permanentes supera o motor de indução. O seu principal ponto fraco ainda se prende com o preço, mas devido ao seu maior rendimento e fiabilidade, o investimento inicial superior acaba por ser recompensado a longo prazo.

O estudo realizado em [29] permite perceber as vantagens obtidas com a utilização de um motor síncrono de ímanes permanentes do tipo '*line-start*' face a um motor de indução. De seguida são demonstrados alguns dos resultados deste estudo comparativo, que para além

de comparar os resultados obtidos experimentalmente, também os compara com aqueles obtidos numa análise FEA (*Finite Element Analysis*) do motor síncrono.

### 3.6.1.1 - Comparação do Fator de Potência

Neste teste, o motor síncrono de ímanes permanentes utilizado tem uma potência nominal de 7,5kW. O motor de indução é um motor de elevada eficiência energética (índice IE3) e apresenta iguais valores de potência nominal, de tensão nominal, de velocidade de sincronismo (igual número de par de pólos), mas tem um núcleo ferromagnético maior.

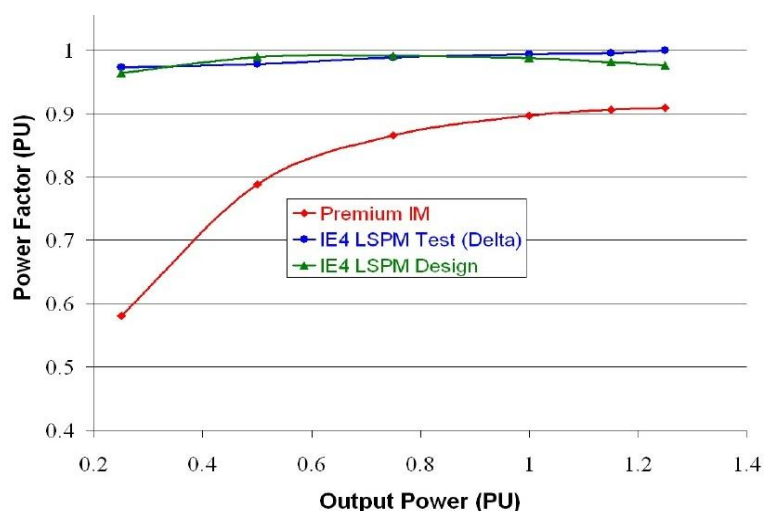


Figura 3.19 - Comparação do fator de potência [29]

A figura 3.19 compara os resultados obtidos para o fator de potência. Como se pode verificar, os resultados experimentais do motor síncrono de ímanes permanentes (*IE4 LSPM Test*) são muito próximos daqueles obtidos através da análise FEA (*IE4 LSPM Design*), mas comparando-os com os resultados experimentais relativos ao motor de indução (*Premium IM*), a diferença é grande, principalmente para um baixo fator de carga.

O motor de indução apresenta assim um grande problema que se prende com o facto do seu fator de potência ser sempre indutivo, significando que, mesmo em condições de funcionamento em vazio, existirá sempre uma componente reativa da corrente a circular nos enrolamentos estatóricos. Isto implica um menor binário para uma mesma corrente quando comparado com o motor síncrono de ímanes permanentes ou, em alternativa, será necessária uma maior intensidade de corrente para se obter o mesmo binário motor. Isto também exige condutores com secções reforçadas.

### 3.6.1.2 - Comparação do Rendimento

A figura 3.20 apresenta graficamente os resultados obtidos do rendimento em função da potência de saída (potência mecânica) para ambos os motores. Para o motor síncrono de ímanes permanentes, os resultados experimentais são ligeiramente superiores aos resultados

obtidos através do cálculo avançado FEA. No caso do motor de indução, é possível verificar que os resultados experimentais obtidos são muito inferiores quando comparados com os resultados experimentais do motor síncrono.

Segundo a norma IEC 60034, para um motor de 7,5kW atingir o índice IE4, este deve ter um rendimento estipulado de 92% no mínimo. No caso do índice IE3, o rendimento deve atingir os 90,5%. Pela análise gráfica, é possível verificar que o motor síncrono de ímanes permanentes facilmente supera o índice IE4 numa larga gama de valores de potência mecânica. Já o motor de indução, supera o índice IE3, no entanto, não consegue atingir o índice IE4.

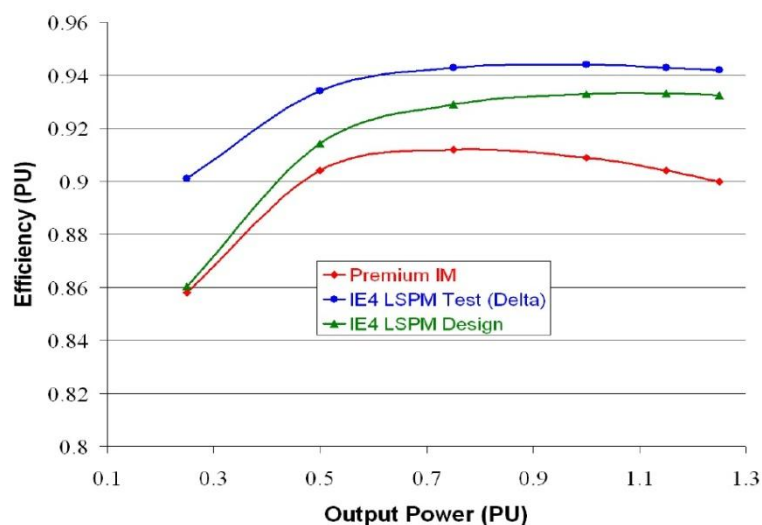


Figura 3.20 - Comparação do rendimento [29]

### 3.6.1.3 - Comparação da Corrente do Induzido

A figura 3.21 representa graficamente a comparação entre as correntes que circulam nos enrolamentos do estator em regime permanente, para uma gama de potência mecânica que vai de 0,25 até 1,25pu (por unidade).

Como se pode concluir através da análise gráfica, o motor de indução apresenta sempre um valor de corrente superior face ao motor síncrono de ímanes permanentes. Com isto, as perdas óhmicas serão superiores, causando assim um rendimento inferior.

Posto isto, sob o ponto de vista da poupança energética, do investimento inicial e do custo de operação a longo prazo, o motor síncrono de ímanes permanentes do tipo '*line-start*' torna-se cada vez mais numa solução economicamente viável e vantajosa, podendo substituir os motores de indução existentes num elevado número de aplicações que exijam velocidade constante ou velocidade variável.

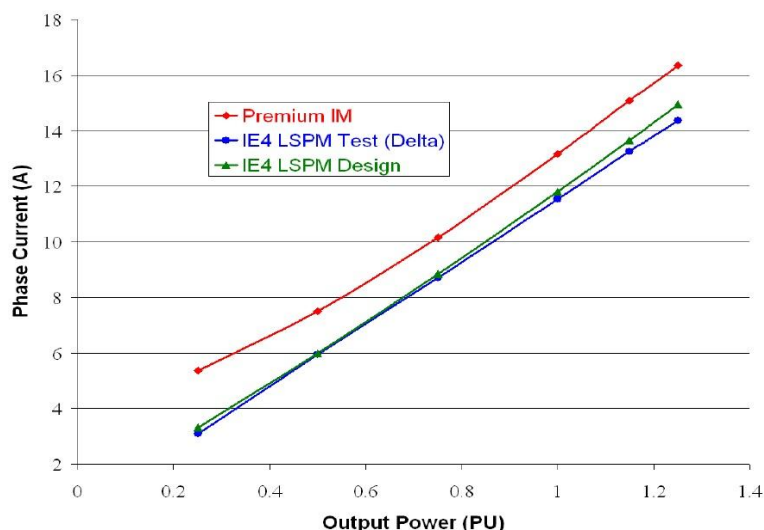


Figura 3.21 - Comparação da corrente do induzido [29]

### 3.6.2 - Motor Síncrono de Ímanes Permanentes vs Motor Síncrono de Relutância

Apesar da supremacia dos motores de indução nos acionamentos industriais, a procura de motores cada vez mais eficientes e mais robustos tem motivado a pesquisa de novas máquinas. De entre estas, os motores de relutância têm vindo a receber um interesse crescente devido às suas principais vantagens: baixo custo de fabrico, construção simples e robusta, alta fiabilidade, baixa manutenção e desempenho elevado.

As máquinas síncronas de relutância constituem uma variante das máquinas síncronas. Neste caso, os enrolamentos de excitação foram suprimidos como acontece nos motores síncronos de ímanes permanentes e explora-se o efeito de relutância, com a construção da máquina de uma forma muito assimétrica do ponto de vista magnético. A reatância transversal chega a ser 10 a 12 vezes superior à reatância longitudinal. Existem várias soluções construtivas, atingindo-se uma boa uniformidade mecânica. Na figura 3.22 pode ser visualizado um motor síncrono de relutância construído pela ABB, com uma das configurações rotóricas mais utilizadas devido à elevada anisotropia magnética obtida.



Figura 3.22 - Motor síncrono de relutância; Fonte: ABB

A par dos motores síncronos de ímanes permanentes, os motores síncronos de relutância mais recentes são motores mais pequenos e leves quando comparados com o motor de indução, apresentando maior densidade de potência. Apresentam um fator de potência e rendimento muito elevados e podem ser utilizados numa larga gama de velocidades. Uma desvantagem do motor síncrono de relutância está relacionada com a necessidade de uma maior intensidade de corrente para obter o mesmo binário que um motor de ímanes permanentes, visto que o indutor encontra-se no estator.

Estruturalmente, são motores que possuem um estator muito idêntico ao utilizado no motor síncrono de ímanes permanentes. A sua grande diferença encontra-se na estrutura rotórica, pois não possui gaiola ou ímanes permanentes. Torna-se, assim, construtivamente um motor muito mais robusto. Além disso, não existe o risco de redução do desempenho, devido à possibilidade de ocorrer desmagnetização parcial dos ímanes permanentes em caso de sobreaquecimento ou avaria.

A ausência de ímanes permanentes no rotor torna o funcionamento deste motor mais seguro, uma vez que não existe a indução de forças contra-eletromotrizes no estator, tornando desnecessária a proteção do conversor em relação a sobretensões.

Por fim, os materiais magnéticos baseados em terras-raras utilizados para a produção de ímanes permanentes são relativamente dispendiosos e o seu fornecimento, em determinadas situações, pode não conseguir fazer frente à procura.

O motor síncrono de relutância é um motor energeticamente muito eficiente, conseguindo alcançar e superar o índice IE4 da norma IEC 60034. Para isto, em muito contribuiu a otimização da sua estrutura rotórica que, devido à inexistência de gaiola e de ímanes permanentes, permitiu o desenvolvimento de motores capazes de competirem tanto com os motores de ímanes permanentes como com os motores de indução.

Como o rotor não possui qualquer tipo de circuito elétrico, a componente de perdas óhmicas é nula. Com isto, consegue-se obter uma estrutura rotórica energeticamente muito eficiente, mais simples e barata. Outro fator que contribui para esta simplicidade construtiva, está relacionada com a inexistência dos ímanes permanentes, que permite obter rotores com uma inércia mais baixa e de maior fiabilidade.

Uma das grandes vantagens que resulta da eliminação das perdas óhmicas no rotor está relacionada com o baixo nível de aquecimento. O funcionamento a baixa temperatura aumenta a vida útil do isolamento do motor, aumenta a duração das chumaceiras e os intervalos entre lubrificações.

Em particular, as chumaceiras do motor necessitam de manutenção regular e representam aproximadamente 70% de todas as paragens não programadas dos motores [34]. Uma menor temperatura das chumaceiras traduz-se diretamente em maiores intervalos entre lubrificações, manutenção mais reduzida e menor fiabilidade. Inclusivamente, se for

necessário mudar uma chumaceira, ao não existirem forças magnéticas, ao contrário do que acontece num motor síncrono de ímanes permanentes, a alteração é tão fácil como num motor de indução.

### 3.6.3 - Motor Síncrono de Ímanes Permanentes vs Motor Síncrono Convencional

Para aplicações de baixa/média potência, o motor síncrono de ímanes permanentes surge como uma solução muito mais vantajosa quando comparada com o motor síncrono convencional. A inexistência de enrolamento indutor traduz-se em maior eficiência energética, pois as perdas óhmicas no rotor são nulas no caso do motor de ímanes permanentes. Assim, o aquecimento interno será menor, pelo que o sistema de ventilação necessário será menos complexo. Outra enorme vantagem prende-se com o nível de manutenção que, no motor síncrono convencional, devido à presença do sistema de anéis/escovas que é suscetível de grande desgaste, é muito frequente.

Na figura 3.23, pode ser visualizado um motor síncrono convencional. A sua utilização torna-se vantajosa em aplicações de elevada potência, onde elevados valores de binário motor são necessários. Devido às suas características de funcionamento, são utilizados, maioritariamente, em grandes acionamentos industriais, nomeadamente na indústria pesada.



Figura 3.23 - Motor síncrono convencional; Fonte: WEG

Os grandes motores síncronos são bastante eficientes em aplicações que necessitem de binário elevado, corrente de arranque reduzida, velocidade constante mesmo com grandes variações de carga e elevado rendimento.

O motor síncrono convencional também possibilita o melhoramento do fator de potência das instalações onde é utilizado. Se o enrolamento indutor for sobreexcitado, o motor

comporta-se como compensador síncrono, podendo assim ser utilizado para correção do fator de potência.

### **3.7 - Imposição no mercado: MSIP vs Motor de Relutância**

Os motores de indução ocupam atualmente entre 80% a 85% de todos os motores elétricos em funcionamento. Para se manterem competitivos e responderem à atual política energética, baseada na poupança da mesma, os fabricantes necessitam de inovar constantemente a sua oferta, produzindo motores com um nível de eficiência cada vez mais elevado e de maior fiabilidade, ao menor custo possível.

Com o aparecimento dos materiais magnéticos permanentes baseados em terras raras, os fabricantes voltaram o seu interesse para o desenvolvimento de motores de ímanes permanentes. Os motores síncronos de ímanes permanentes são motores que apresentam um rendimento muito elevado, superando o índice IE4 da norma IEC 60034, numa gama de potências muito alargada. Apresentam uma elevada robustez construtiva, assim como uma elevada fiabilidade e um baixo nível de manutenção. Devido ao elevado produto energético máximo conseguido com os ímanes permanentes baseados em terras raras, estes motores podem ser utilizados em aplicações de binário considerável. Por fim, apresentam um fator de potência muito elevado, devido ao campo criado pela presença dos ímanes permanentes. A problemática do controlo foi, também, ultrapassada, com o desenvolvimento dos dispositivos eletrónicos de potência.

No entanto, quando o objetivo dos fabricantes passa pela produção em massa, para além das principais características de funcionamento, outros fatores tais como o custo de produção, fiabilidade, disponibilidade e custo dos materiais utilizados na sua construção, devem ser ponderados.

Um dos fatores que tem estado no centro das preocupações por parte dos fabricantes dos motores de ímanes permanentes, prende-se com a recente instabilidade do preço e da disponibilidade dos elementos de terras raras, tais como o neodímio e o disprósio. Estes elementos, principais constituintes dos ímanes permanentes baseados em terras-raras, viram o seu preço atingir máximos históricos em 2011. A China, principal produtor destes ímanes permanentes, devido à sua crescente necessidade, viu-se obrigada a restringir a sua disponibilidade. Posto isto, e tendo em conta que a procura é muito elevada, o preço disparou, atingindo valores preocupantes para os fabricantes que têm apostado neste tipo de motores.

Tendo em conta este cenário, algumas empresas como a ABB anteciparam-se, tendo apostado nos motores síncronos de relutância [34]. A contínua investigação, a par da aposta dos fabricantes nesta tecnologia, levou ao desenvolvimento de motores síncronos de

relutância capazes de concorrer tanto com os motores de indução como com os motores síncronos de ímanes permanentes.

Face aos motores síncronos de ímanes permanentes, apresentam a vantagem de possuírem um rotor mais robusto, mais pequeno e mais fiável visto que não possuem ímanes permanentes ou qualquer tipo de enrolamento. Outra prende-se com os requisitos técnicos que em sede de manutenção, como dito, devido à ausência dos ímanes e dos fortíssimos campos magnéticos por estes criados, se torna uma solução mais simples e barata. Assim, a não dependência de materiais caros e de disponibilidade limitada, é vista como uma vantagem que pode fazer a diferença num futuro a médio/longo prazo no mercado de motores elétricos.

### 3.8 - Síntese

Este capítulo focou-se, essencialmente, na máquina síncrona de ímanes permanentes, em modo de funcionamento como motor. Foram estudados os seus aspetos construtivos, dando especial atenção à constituição das topologias rotóricas mais comuns.

O princípio de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes foi descrito. Quanto às características de funcionamento, deu-se especial enfoque à característica do binário em função do ângulo de carga. O binário relutante resultante do circuito magnético anisotrópico foi evidenciado.

A fase crítica do arranque foi estudada. As soluções frequentemente adotadas para minimizar os efeitos negativos do arranque direto, apesar de possível em alguns motores, foram explanadas.

Por fim, foi feita uma análise comparativa do motor síncrono de ímanes permanentes com outros motores, em especial com motor de indução. O desenvolvimento de novos e melhores materiais magnéticos tem também levado algumas empresas a apostar no motor de relutância.



# Capítulo 4

## Investigação Experimental

Neste capítulo descreve-se a atividade experimental desenvolvida em ambiente laboratorial com o objetivo de analisar o comportamento das principais características de funcionamento de um motor síncrono de ímanes permanentes, alimentado a partir de fontes de alimentação com características diferentes.

Inicialmente é feita a caracterização do meio laboratorial no qual foi desenvolvida a experiência. São evidenciadas as normas eletrotécnicas mais utilizadas no setor dos motores elétricos, das quais surgiu o procedimento experimental seguido durante o trabalho e que se encontra devidamente explanado.

As diferentes fontes de alimentação, assim como as respetivas formas de onda da tensão são caracterizadas.

Posteriormente, são apresentados os resultados obtidos nos diferentes ensaios, sendo efetuada uma análise comparativa das características de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes quando alimentado pelos diferentes tipos de fontes de alimentação.

Por fim, é descrita uma breve síntese conclusiva sobre o trabalho experimental realizado.

### 4. 1 - Introdução

A globalização tem tido, no setor industrial, um papel preponderante para as empresas que ambicionam obter, a todos os níveis, um crescimento significativo. No entanto, este facto, veio acrescentar maiores responsabilidades devido ao elevado grau de concorrência existente nos diferentes segmentos da indústria, a par dos elevados níveis de exigência por parte dos clientes.

Como acontece na generalidade, as empresas de máquinas elétricas não estão imunes ao elevado nível concorrencial existente neste segmento da indústria, pelo que têm uma forte

necessidade de inovar constantemente toda a sua gama de produtos com o objetivo de conseguir satisfazer e cativar um número de clientes cada vez maior.

No caso específico dos motores elétricos, que representam cerca de 40% de toda a energia consumida globalmente [37], a inovação tem de estar sempre presente. A construção de novas soluções caracterizadas por uma elevada robustez e fiabilidade, conjugada com baixos níveis de manutenção e elevados níveis de eficiência, capazes de satisfazer os índices de eficiência energética exigidos pelas normas eletrotécnicas internacionais, representa uma árdua tarefa para os fabricantes de máquinas elétricas. Assim, num panorama de elevada exigência, o lançamento de soluções altamente flexíveis assume um papel cada vez mais importante no setor industrial de produção de motores elétricos.

Neste contexto, surge o estudo experimental desenvolvido no âmbito deste trabalho, que teve como principal objetivo analisar e comparar o comportamento das principais características de funcionamento de um motor topo de gama quando sujeito a diferentes formas de alimentação. A título de exemplo, é efetuado o estudo do comportamento do motor quando alimentado por um sistema trifásico simétrico de tensões alternadas sinusoidais, idêntico ao utilizado nos EUA no setor industrial, de baixa tensão, onde a onda da tensão nominal é caracterizada por uma tensão composta de 460V e frequência de 60Hz. Com isto, e sendo o motor em estudo concebido para trabalhar na rede de baixa tensão europeia (ou equivalente), procura-se testar a flexibilidade do funcionamento destas máquinas quando sujeitas a condições de alimentação diversas.

Este estudo, que teve lugar no Laboratório de Máquinas Elétricas da FEUP, centrou-se na utilização de uma máquina síncrona de ímanes permanentes recentemente desenvolvida pela WEG. Esta máquina atinge níveis de eficiência que superam o índice de eficiência *Super Premium* (IE4) da norma IEC 60034.

Os principais ensaios realizados centraram-se na exploração da máquina, no modo de funcionamento como motor, em regime permanente, alimentada com diferentes fontes de alimentação. Em cada ensaio, realizaram-se leituras com o objetivo de se obterem as principais curvas características de funcionamento do motor síncrono em estudo. Na tabela 4.1 encontram-se descritos os tipos de alimentação utilizados nos diferentes ensaios.

## 4. 2 - Caracterização Laboratorial

A caracterização laboratorial surge como um ponto de extrema importância para se perceber sob que condições foram realizados os ensaios. Neste ponto, são descritas as características principais da máquina elétrica ensaiada, da banca de ensaios e dos aparelhos de medida utilizados durante a atividade experimental.

Tabela 4.1 - Ensaaios realizados no Laboratório de Máquinas Elétricas

Ensaio	Tipo de Alimentação	Descrição
1	400V - 50Hz (sinusoidal)	O motor é alimentado diretamente da rede por um sistema trifásico de tensões simétricas.
2	460V - 60Hz (sinusoidal)	O motor é alimentado através de um gerador síncrono que fornece um sistema trifásico de tensões simétricas.
3	400V - 50Hz com VEV (PWM)	O motor é alimentado através de um variador eletrónico de velocidade (VEV) que se encontra ligado à rede.

#### 4.6.1 - Motor Elétrico

A máquina elétrica ensaiada é uma máquina síncrona trifásica de ímanes permanentes. Foi desenvolvida pela empresa multinacional WEG que, atualmente, tem mantido uma forte aposta no segmento *Premium* e *Super Premium* de motores elétricos com as suas linhas W21 e W22 (motores de indução), e *WQuattro* (motores síncronos) [38].

O motor utilizado neste estudo trata-se de um modelo *WQuattro*, modelo este caracterizado por exceder o índice de eficiência IE4 - *Super Premium*, de acordo com as normas IEC, que se encontra representado na figura 4.1.



Figura 4.1 - Motor síncrono de ímanes permanentes - modelo *WQuattro*; Fonte: WEG

Seguidamente, na tabela 4.2, é apresentada a chapa de características deste motor. São, ainda, referenciadas as principais características da máquina. No Anexo A encontra-se a folha de características completa da respetiva máquina.

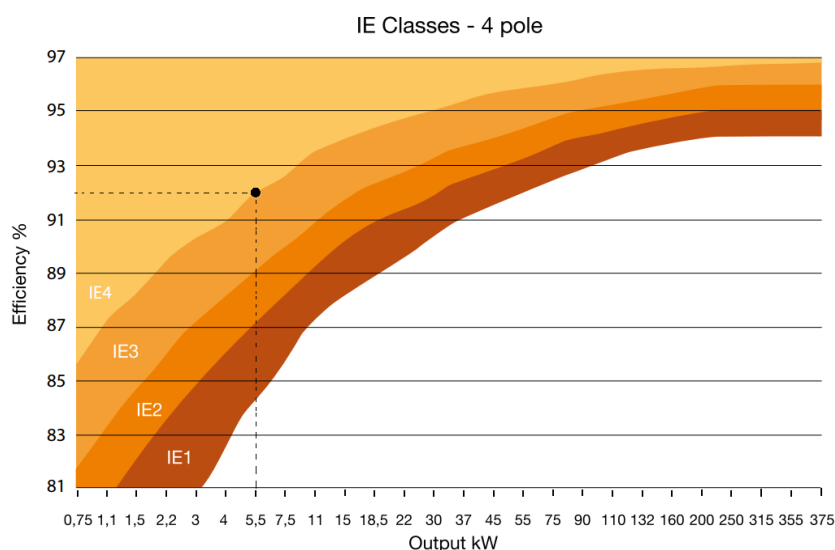
Tabela 4.2 - Chapa de Características do Motor *WQuattro*

Características	Chapa de Características
Motor síncrono de ímanes permanentes (3~)	
Fabricante: <i>WEG</i> ; Modelo: <i>WQuattro</i>	
Tipo: <i>Line Start</i> ; IE4 - $\eta = 92,5\%$	
$U = 400/690V$ ; $I = 9,23/5,35A$ ; Ligação $\Delta$ -Y	
$P = 5,5kW$ ; $\cos \varphi = 0,93$ (i)	
$n = 1500$ rpm ; $f = 50Hz$	

Pela análise da chapa de características do respetivo motor, é de destacar o rendimento sugerido pelo fabricante que, para um fator de carga unitário, é de 92,5%. Como se pode ver na figura 4.2, este valor situa-se bem acima dos 91,8% referenciados pela norma IEC 60034-31 de 2010 que, para um motor de 5,5kW com 2 pares de pólos, determinam o valor de referência para o índice IE4.

É um motor síncrono trifásico do tipo ‘line start’ que, como já mencionado, promove um arranque assíncrono, devido à presença da gaiola rotórica. Por isto, este motor é muitas vezes referenciado como motor híbrido. Durante o arranque, ele funciona como motor assíncrono, já em regime permanente, o seu funcionamento é síncrono e, portanto, o deslizamento é nulo.

O fator de potência, como acontece com o rendimento, é também elevado, atingindo o valor de 0,93 (i) à plena carga, segundo informação que consta na chapa de características.

Figura 4.2 - Índices de Eficiência - IEC 60034-31 ( $p=2$  -  $f=50Hz$ ); Fonte: ABB [39]

Quanto ao tipo de serviço, é um motor vocacionado para trabalhar em regime contínuo. Este tipo de serviço, segundo a norma 60034-1 de 2010, é classificado pela sigla 'S1', e é definido pela operação do motor com carga constante, por um período de tempo suficiente, que permita a máquina alcançar o equilíbrio térmico [40].

#### 4.6.2 - Banca de Ensaios

A banca de ensaios utilizada durante a atividade experimental é constituída por um conjunto de equipamentos que proporcionaram a realização dos ensaios previstos para a determinação das características de funcionamento do motor. O principal equipamento constituinte da banca é um dinamómetro elétrico, como se pode ver na figura 4.3.

O motor encontra-se acoplado ao dinamómetro que, para além de permitir ler o binário e a velocidade, permite regular o binário resistente aplicado ao eixo do motor. Esta máquina é caracterizada por ser uma máquina rotativa de corrente contínua que pode funcionar como gerador (freio), para teste de motores, ou como motor, para teste de geradores. No caso de estudo a que se refere este texto, só o modo de funcionamento como gerador tem interesse, visto que o objetivo principal do ensaio é estudar o comportamento da máquina síncrona de ímanes permanentes a funcionar como motor, aquando da aplicação de diferentes valores de binário resistente no seu eixo para simular diversos regimes de carga.

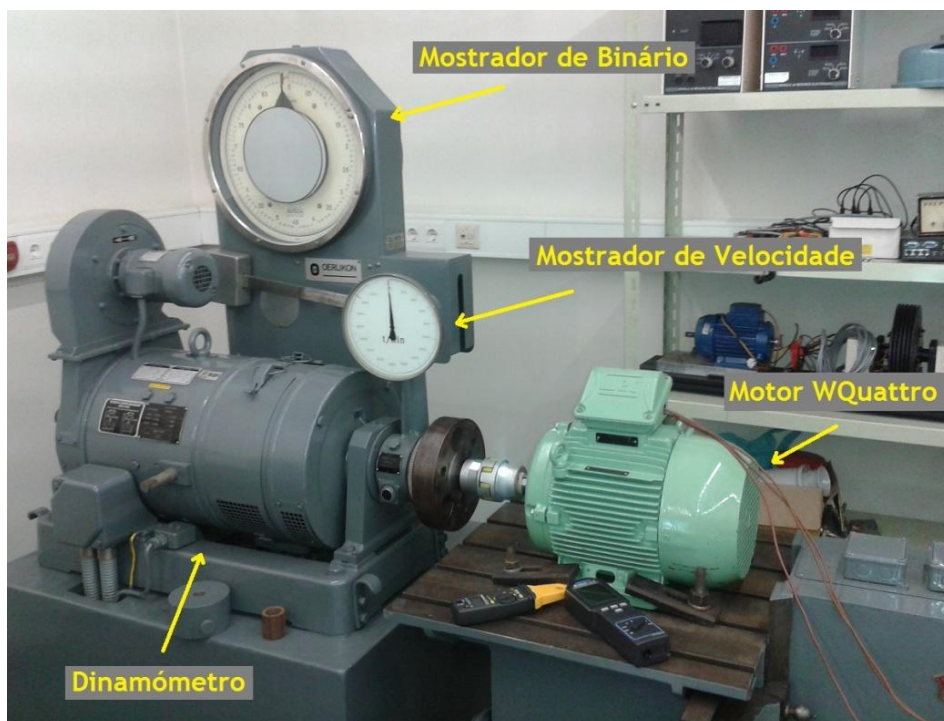
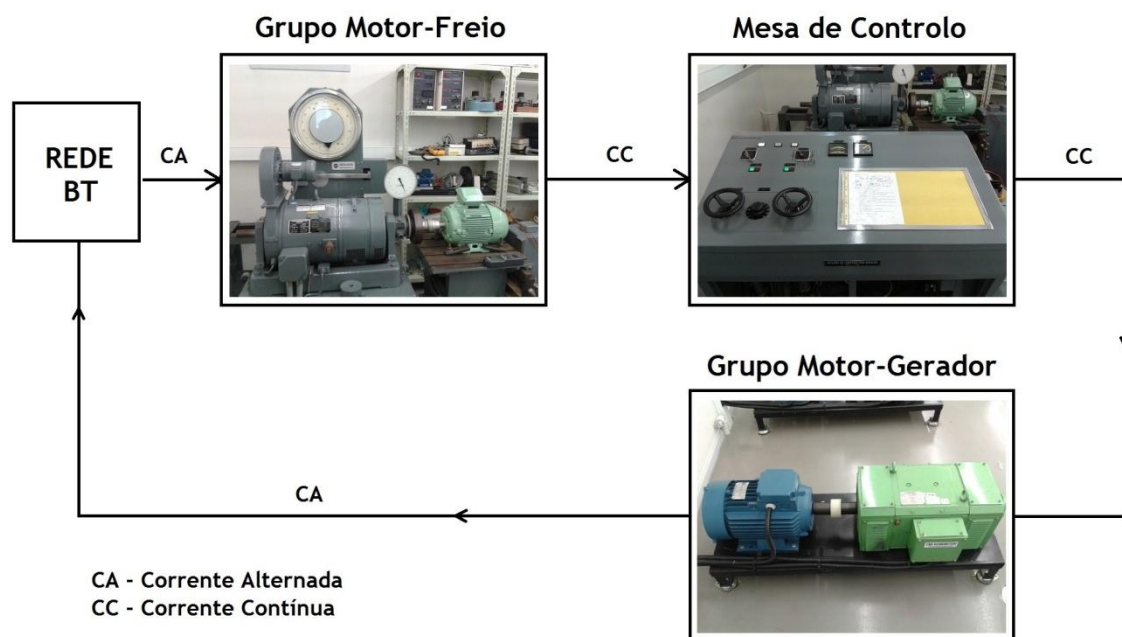


Figura 4.3 - Banca de Ensaios

Durante os ensaios, a energia elétrica gerada pelo freio, não será dissipada em resistências dissipativas como acontece com alguns tipos de freios, mas sim reaproveitada e

colocada novamente na rede. O ciclo de energia deste sistema encontra-se esquematizado na figura 4.4. Assim, a energia elétrica gerada pelo freio, subtraída das perdas por efeito de Joule nos reóstatos da mesa de controlo, será absorvida pela máquina de corrente contínua do grupo motor-gerador, que se encontra a funcionar como motor. Por sua vez, o gerador, uma máquina de indução trifásica, recebe a energia mecânica, converte-a em energia elétrica e devolve-a à rede trifásica de baixa tensão (BT).

O grupo motor - gerador é um grupo reversível. Inicialmente, a máquina de indução é utilizada como motor para se proceder ao arranque do grupo. Já em regime permanente, a máquina CC a ele acoplado gera uma f.e.m. de aproximadamente 110V (tensão nominal do induzido a 1500rpm). Posteriormente, com o grupo motor-freio a trabalhar também em regime permanente, procede-se à excitação do freio, através da devida regulação dos potenciômetros que se encontram na mesa de controlo, até que este apresente aos seus terminais uma f.e.m. de aproximadamente 110V contínuos. Neste momento, estão reunidas as condições para se fazer o acoplamento das duas máquinas de corrente contínua, passando a máquina CC do grupo motor-gerador a funcionar como motor, rodando à velocidade de 1500 rpm, com potencial de colocar assim a máquina de indução a funcionar como gerador, visto que é uma máquina de quatro pólos.



**Figura 4.4 - Ciclo de Energia**

Após todo este processo de arranque da banca de ensaios, o controlo da corrente de excitação do freio tem de ser executado manualmente através da regulação dos potenciômetros existentes na mesa de controlo. Assim, sempre que, durante os ensaios, existe a necessidade de se variar o binário resistente aplicado ao eixo do motor, há a necessidade de se proceder à regulação da excitação do freio eletromagnético.

#### 4.6.3 - Aparelhagem de Medida

Durante os ensaios, vários tipos de erros podem ser cometidos durante as leituras influenciando o valor real das grandezas medidas. Erros associados aos aparelhos de medida, ao procedimento experimental seguido ou a fatores humanos são comuns.

A precisão dos aparelhos de medida é um fator a ter em conta quando se necessita de fazer um ensaio rigoroso. Por exemplo, no cálculo do rendimento de um motor síncrono ou assíncrono, as normas eletrotécnicas mais utilizadas na indústria para este efeito, como a norma IEEE 112 ou a norma IEC 60034-2-1, definem critérios quanto à precisão dos aparelhos a utilizar, para que os resultados finais possam ser o mais precisos possível. Na tabela 4.3, encontram-se os valores máximos aceitáveis para o erro dos diferentes aparelhos (em %), definidos por ambas as normas anteriormente citadas.

As classes de precisão dos aparelhos de medida utilizados para medir as grandezas necessárias para o cálculo do rendimento e das perdas nem sempre corresponderam aos valores considerados nas normas. No entanto, este facto não terá grande relevância, visto que, para além da classe de precisão dos aparelhos utilizados ser considerada elevada, o objetivo deste trabalho não se prende diretamente com a determinação do rendimento específico deste motor, que foi já determinado pelo fabricante segundo as normas.

Na figura 4.5, encontram-se alguns dos aparelhos utilizados. Em (a) e (b) encontram-se representados os mostradores de binário e de velocidade do dinamómetro, respetivamente. Em (c) podem ser visualizados um multímetro digital utilizado para medir a tensão eficaz aos terminais do motor e a frequência, um amperímetro analógico para medição da corrente de fase e dois wattímetros, também analógicos, para medição da potência ativa pelo método de Aron.

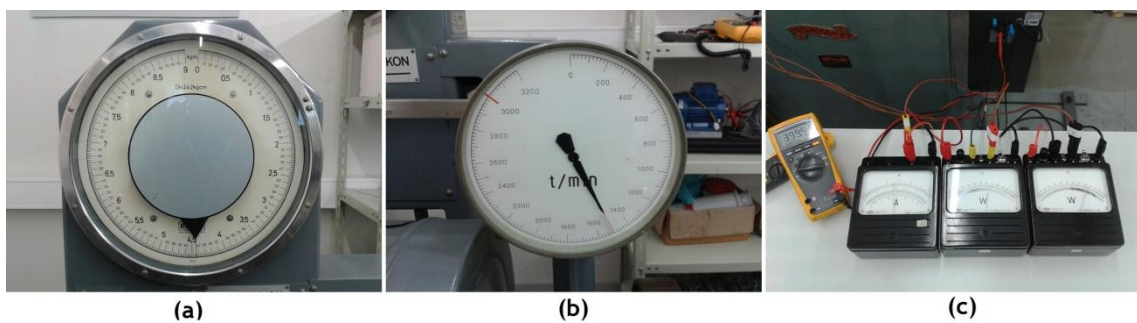


Figura 4.5 - Aparelhos de medida

**Tabela 4.3** - Precisão dos aparelhos de medida(em %), segundo as normas

Variável	IEEE 112	IEC 34-2-1
Tensão	0,2	0,2
Corrente	0,2	0,2
Potência	0,2	0,2
Binário	0,2	0,2
Frequência	0,1	0,1
Resistência	0,2	0,2

### 4. 3 - Procedimento Experimental

O procedimento experimental deve ser apoiado numa base metodológica bem definida para se obter um conjunto de resultados rigoroso e com um grau de precisão satisfatório. Globalmente, a norma IEEE 112, publicada pela organização IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), é aquela que maior aceitação tem tido para a determinação do rendimento e perdas de motores de indução na indústria, especialmente nos Estados Unidos da América. Na Europa, até há pouco tempo, a norma mais utilizada para efeitos de determinação do rendimento e perdas era a norma IEC 60034-2. Era uma norma de fácil implementação prática, que requeria pouca informação para a determinação da temperatura dos enrolamentos e das perdas adicionais. Consequentemente, esta norma foi sendo bastante criticada devido à pouca precisão evidenciada pelos resultados. Não obstante, em 2007, surge uma nova versão mais cuidada com a norma IEC 60034-2-1 para aplicação em motores assíncronos, síncronos e de corrente contínua. Esta norma define um conjunto de métodos, procedimentos e classes de precisão instrumental mais rigoroso, aproximando-se bastante daquele definido na norma IEEE 112. A principal diferença prende-se com o procedimento para a determinação das perdas suplementares e para a correção da temperatura dos enrolamentos utilizada para obtenção das perdas no cobre [41].

A reformulação da antiga norma IEC 60034-2 tomou como referência a norma IEEE 112. Isto deveu-se ao facto desta última, devido ao maior rigor exigido nos ensaios, ter alcançado uma precisão de resultados já comprovada ao longo dos últimos anos, tornando-a internacionalmente aceite. Entretanto, estudos comparativos realizados entre a aplicação das normas IEEE 112 e IEC 60034-2-1, como aquele que acontece em [41], permitiram chegar à conclusão de que os resultados alcançados, para a determinação do rendimento elétrico, eram aproximadamente os mesmos, desde que o método seguido para determinação das perdas fosse similar.

Neste trabalho, inicialmente, pensou-se em seguir a nova norma IEC 60034-2-1 devido à sua ampla aceitação na Europa. Foi, também, a norma seguida pelo fabricante do motor para a determinação do rendimento que, à carga nominal, ultrapassa o índice de eficiência IE4



definido pela recente norma IEC60034-31 publicada pela mesma instituição, a Comissão Eletrotécnica Internacional (em inglês, *International Electrotechnical Commission* - IEC). No entanto, devido a questões que se prenderam com o difícil acesso à recente norma IEC 60034-2-1 na íntegra, aquela que serviu de base para a determinação do rendimento do motor *WQuattro* utilizado neste estudo experimental, foi a norma IEEE 112 de 2004. Contudo, a norma IEC60034 não foi completamente descartada, pelo que, como se verá mais à frente, o procedimento seguido para a determinação da temperatura e resistência dos enrolamentos do estator, para os diferentes regimes de carga, foi baseado nesta norma.

A norma IEEE 112 é direcionada para aplicação em máquinas de indução mas, devido à semelhança construtiva de ambas as máquinas e dos procedimentos utilizados para o cálculo do rendimento, esta pode ser aplicada à máquina síncrona de ímanes permanentes, como acontece com a norma IEC 60034-2-1, sem prejuízo para a precisão dos resultados finais.

A norma IEEE 112 apresenta diversos métodos para a determinação do rendimento da máquina e das perdas que nela ocorrem. Os métodos mais comuns são:

- Método A

É um método bastante utilizado em laboratório, que permite obter um conjunto de resultados satisfatório mas não tão aprofundado como aquele obtido pelo método B a seguir apresentado. A norma refere que este método deve ser aplicado para máquinas de potência inferior a 1kW [42]. É um método simples mas que permite obter resultados precisos. O rendimento é calculado pelo quociente entre a potência de saída e a potência de entrada. Quanto às perdas, apenas são calculadas as perdas no cobre. Comparativamente, este método é idêntico ao método direto evidenciado na norma IEC, para o cálculo do rendimento.

- Método B

É o método mais utilizado na indústria e deve ser aplicado para o teste de máquinas cuja potência se situe entre 1 e 300 kW [42]. Neste método, há separação das perdas, ou seja, são determinadas as perdas por efeito de Joule, as perdas magnéticas, as perdas mecânicas e as perdas adicionais ou suplementares. É um método rigoroso que introduz fatores de correção. Comparativamente com a sua homóloga da IEC, este método corresponde ao método indireto para o cálculo do rendimento.

- Métodos B1, C, E, E1, F, F1, C/F, E/F, E1/F1

Estes são os restantes métodos divulgados por esta norma, e encontram aplicação em casos especiais como máquinas de potência superior a 300kW, máquinas de carcaça vertical, entre outros.

O motor síncrono de ímanes permanentes é caracterizado por ter uma potência nominal de 5,5kW, sendo que o método a seguir deveria ser o método B. É um método caracterizado por um procedimento experimental rigoroso onde o cálculo do rendimento é acompanhado da respetiva segregação das perdas. Assim, a potência de perdas total é dividida nas suas várias componentes, sendo que a componente de perdas suplementares é igual à diferença entre a totalidade das perdas e a soma das perdas convencionais (óhmicas, magnéticas e mecânicas) [43]. Na figura 4.6, é possível visualizar-se o esquema do fluxo de potência que ocorre na máquina síncrona de ímanes permanentes, destacando-se os diferentes tipos de perdas.

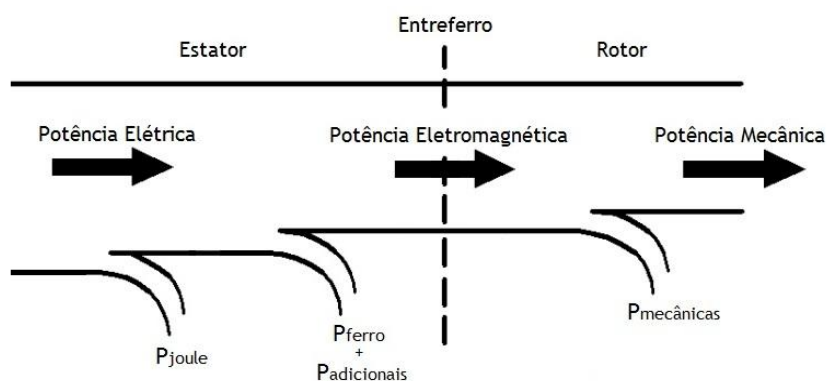


Figura 4.6 - Fluxo de potência da MSIP

Como o objetivo principal deste trabalho não se centra no cálculo do rendimento e das diferentes componentes de perdas associadas ao motor, o método seguido não foi o método B, mas sim o método A. É um método simples e eficaz que encontra bastante aplicação, principalmente em máquinas de baixa potência, quando há a necessidade de se fazer um teste de forma não tão minuciosa como acontece com o método B. Seguidamente, é apresentado o procedimento seguido pelos ensaios realizados no Laboratório de Máquinas Elétricas da FEUP.

O procedimento experimental seguido para a determinação do rendimento, baseado no método A da norma IEEE 112, dividiu-se em quatro fases principais. São elas:

- Fase F1 - Medição da resistência a frio
- Fase F2 - Ensaio de temperatura à carga nominal
- Fase F3 - Ensaio em carga
- Fase F4 - Determinação do rendimento e das perdas no cobre

#### 4.3.1 - Medição da Resistência a Frio

A medição da resistência a frio é um teste feito antes de se iniciar o teste de temperatura à carga nominal, ou seja, antes de se colocar o motor em funcionamento. Tem como objetivo obter a temperatura e a resistência dos enrolamentos de cobre para essa

mesma temperatura. Este par de valores temperatura - resistência servirá de referência para o cálculo posterior de novos pares de valores de temperatura e resistência.

Para a medição da temperatura, a norma define alguns métodos como a aplicação de vários sensores de temperatura colocados localmente em pontos específicos da máquina ou a aplicação de sensores embebidos na máquina para um resultado com maior precisão. No entanto, a aplicação de tais métodos no laboratório não se encontrava acessível, pelo que o método adotado foi o método da medição da resistência, também definido pela norma e amplamente utilizado.

Assim, após o motor ficar sem funcionar durante um período de tempo suficiente para que todas as partes tenham atingido o equilíbrio térmico à temperatura ambiente, considerou-se a temperatura ambiente como sendo a temperatura inicial dos enrolamentos estatóricos. De seguida, procedeu-se à medição da resistência estatórica através do método voltímetro-amperímetro, que permite a leitura da corrente que circula entre duas fases pela aplicação duma tensão contínua aos seus terminais. Este processo é realizado entre todas as fases do motor (U1-V1, U1-W1 e V1-W1), calculando-se a resistência por fase pela aplicação da Lei de Ohm.

É assim obtido o valor da resistência média estatórica por fase,  $R_{amb\_inicial}$ , para a temperatura ambiente local,  $\theta_{amb\_inicial}$ , que se considera a temperatura à qual se encontra o cobre antes de qualquer ensaio. Sabendo que os enrolamentos do estator se encontram ligados em triângulo, considerando as três fases equilibradas, a resistência será dada por:

$$R_{amb\_inicial} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{R_{U1-V1} + R_{U1-W1} + R_{V1-W1}}{3} \right) \quad (4.1)$$

onde

$R_{amb\_inicial}$  é a resistência média do estator, por fase, à temperatura ambiente inicial, em  $\Omega$

$R_{U1-V1}$  é a resistência medida entre a fase U1 e V1, em  $\Omega$

$R_{U1-W1}$  é a resistência medida entre a fase U1 e W1, em  $\Omega$

$R_{V1-W1}$  é a resistência medida entre a fase V1 e W1, em  $\Omega$ .

Após a conclusão da medição da resistência a frio, procede-se ao teste de temperatura à carga nominal.

#### 4.3.2 - Ensaio de Temperatura à Carga Nominal

O ensaio de temperatura à carga nominal tem como objetivo principal obter a variação de temperatura,  $\Delta\theta$ , acima da temperatura ambiente, quando a máquina se encontra a funcionar à plena carga durante um período de tempo suficiente para que o equilíbrio térmico do motor seja atingido. Assim, esta variação  $\Delta\theta$  pode ser determinada por:

$$\Delta\theta = \theta_{medida} - \theta_{amb\_final} \quad (4.2)$$

onde

$\theta_{medida}$  é a temperatura dos enrolamentos medida após o teste de temperatura, em °C

$\theta_{amb\_final}$  é a temperatura ambiente no fim do ensaio, em °C.

A determinação da variação da temperatura, ou do crescimento da temperatura, é importante porque a norma estipula que o rendimento deve ser calculado tendo como base a temperatura específica de funcionamento, ou seja, a temperatura corrigida tendo como base a temperatura ambiente de 25°C. Esta temperatura específica é calculada pela expressão seguinte:

$$\theta_{corrigida} = \Delta\theta + \theta_{amb\_ref} \quad (4.3)$$

onde

$\theta_{corrigida}$  é a temperatura específica de funcionamento, em °C

$\theta_{amb\_ref}$  é a temperatura ambiente de referência, que corresponde a 25°C.

Para os ensaios realizados neste trabalho experimental, a temperatura específica de funcionamento,  $\theta_{corrigida}$ , foi calculada. No entanto, quando o ensaio de temperatura à carga nominal não for realizado, a norma especifica um valor para a temperatura específica que se encontra tabelado, valor esse que depende da classe de isolamento da máquina e que pode ser consultado na tabela 4.4.

#### 4.3.2.1 - Procedimento Experimental

Após o teste da medição da resistência a frio estar concluído, o motor deve ser colocado a funcionar à plena carga durante um período de tempo que o permita atingir o equilíbrio térmico. Segundo a norma, o equilíbrio térmico é atingido quando a variação da temperatura é igual ou inferior a 1°C num intervalo de tempo de 30 minutos.

Neste trabalho, após a colocação do motor a funcionar em regime de carga nominal, de 30 em 30 minutos era efetuada uma medição da temperatura através de uma sonda, num ponto quente localizado na carcaça do motor. O ponto quente onde se fazia a medição da temperatura assim como a respetiva sonda podem ser visualizados na figura 4.7.

Por norma, após 30 minutos em funcionamento à carga nominal, eram realizadas 4 medições de temperatura, de 30 em 30 minutos, até se obter uma variação igual ou inferior a 1°C. Isto permite concluir que, para a temperatura ambiente média que se verificava no laboratório, o motor atingia o equilíbrio térmico, num intervalo de tempo aproximado de 2 horas.

**Tabela 4.4** - Temperatura específica segundo as diferentes classes de isolamento; Fonte: IEEE 112

Classe de Isolamento	Temperatura (°C)
A	75
B	95
F	115
H	130

Como a sonda apresentada na figura 4.7 não é a mais indicada para a medição da temperatura do motor, e referindo a norma a necessidade de vários sensores de temperatura, a resistência e respetiva temperatura foram obtidas pelo método da medição da resistência anteriormente referido. Para tal, após o equilíbrio térmico ter sido atingido, desliga-se a alimentação da banca de ensaios e do motor, e, quando o motor parar completamente, procede-se à medição da resistência através do método voltímetro-amperímetro. Todo este processo de desligar o motor e medir a resistência estatórica deve ser feito o mais rápido possível para se obter um valor de resistência aceitável. Para máquinas de potência igual ou inferior a 50kVA, a norma especifica que a partir do instante em que se desliga a alimentação do motor, o intervalo de tempo para se proceder à medição da resistência não deverá ultrapassar os 30 segundos.

Finalizado o processo de medição da resistência dos enrolamentos, dá-se por concluído o teste de temperatura à carga nominal. Após este teste, a máquina é novamente colocada a operar à plena carga, e quando atingido novamente o equilíbrio térmico, inicia-se o teste em carga para determinação do rendimento e respetivas perdas.

**Figura 4.7** - Localização de um ponto quente na carcaça do motor e respetiva sonda de temperatura

#### 4.3.2.2 - Cálculo da Temperatura Específica de Funcionamento

Com os pares de valores de tensão e corrente obtidos pela aplicação do método voltímetro-amperímetro, calculam-se as resistências entre fases e obtém-se o valor médio da resistência estatórica, por fase, após o ensaio de temperatura:

$$R_{medida} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{R_{U1-V1} + R_{U1-W1} + R_{V1-W1}}{3} \right) \quad (4.4)$$

A temperatura de funcionamento do motor, à carga nominal, pode agora ser calculada através da expressão 4.5:

$$\theta_{medida} = \left( \frac{R_{medida}}{R_{amb\_inicial}} \times (\theta_{amb\_inicial} + k_1) \right) - k_1 \quad (4.5)$$

onde

$\theta_{medida}$  é a temperatura dos enrolamentos após o ensaio de temperatura, em °C

$R_{medida}$  é a resistência medida após o ensaio de temperatura, por fase, em  $\Omega$

$\theta_{amb\_inicial}$  é a temperatura ambiente medida na fase F1, em °C

$R_{amb\_inicial}$  é a resistência ambiente medida na fase F1, em  $\Omega$

$k_1$  corresponde a 234,5 para o cobre recozido [43]

Normalmente, a temperatura ambiente inicial registada no laboratório, rondava os 17°C. Depois do teste de temperatura, devido à energia térmica libertada pelas máquinas e pelo conjunto de resistências que compõem o módulo de excitação do freio, a temperatura ambiente subia rapidamente para um valor bastante próximo da temperatura ambiente de referência, ou seja, dos 25°C.

Como a norma indica que o cálculo do rendimento deve ser corrigido para a temperatura específica de funcionamento,  $\theta_{corrigida}$ , esta pode agora ser calculada pela aplicação das equações 4.2 e 4.3 anteriormente mencionadas.

#### 4.3.2.3 - Cálculo da Temperatura para cada Regime de Carga

A resistência elétrica dos enrolamentos varia com a temperatura. Desta forma, as perdas óhmicas também vão variar, afetando o rendimento. Assim, determinar o rendimento para um motor que funcione com uma temperatura ambiente de 20°C, é diferente de determinar o rendimento para esse mesmo motor quando ele trabalha num local onde se verifique, por exemplo, uma temperatura de 40°C. Tendo em conta que a resistência aumenta com o aumento da temperatura, na situação em que o motor opera com uma temperatura ambiente superior, as perdas serão maiores e, consequentemente, o rendimento será menor comparativamente com aquele calculado para uma temperatura ambiente de 20°C. No sentido de contrariar esta situação, a norma prevê que a determinação do rendimento, assim como das perdas óhmicas, tome como referência para a temperatura ambiente, a

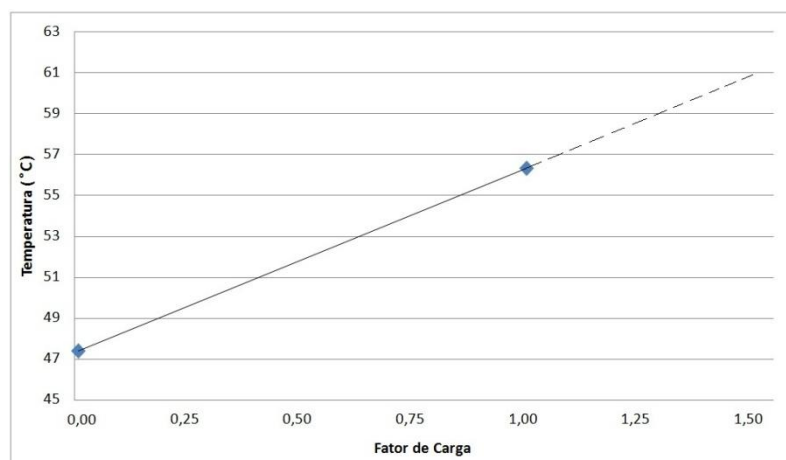
temperatura de 25 °C. Por esta razão, se torna necessário o cálculo da temperatura específica de funcionamento.

A temperatura específica de funcionamento,  $\theta_{\text{corrigida}}$ , deve ser calculada para todos os regimes de carga ensaiados para, posteriormente, se proceder às devidas correções na determinação das perdas e do rendimento.

A norma estipula que, após a medição da temperatura de funcionamento medida no ensaio de temperatura à carga nominal, se realize o ensaio em carga e que, para os diferentes regimes de carga, se façam as leituras das respetivas temperaturas de funcionamento assim como da respetiva temperatura ambiente, para, posteriormente, se proceder ao cálculo das variações de temperatura,  $\Delta\theta_i$  ( $i=25\%$  carga, 50% carga, etc.).

Como a norma prevê a utilização de sensores de temperatura, para o registo de temperatura ao longo do ensaio em carga, e, como no laboratório, este tipo de material não se encontrava acessível, nem a determinação da temperatura pelo método voltímetro-amperímetro, para cada regime de carga, se afigura como uma solução eficaz, devido ao elevado tempo que levaria todo o processo de desligar, medir e ligar novamente todas as máquinas, o procedimento seguido, para a determinação da temperatura, foi aquele previsto na norma IEC 60034-2-1.

O procedimento para a determinação da temperatura, segundo a norma IEC supracitada, diz que duas leituras de resistência deverão ser realizadas. A primeira leitura deverá ser realizada logo após o ensaio de temperatura à carga nominal, como demonstrado anteriormente, e, a segunda, deverá ser feita logo após o término do ensaio em carga. Com esse par de valores de resistência, obtêm-se as respetivas temperaturas aplicando-se a expressão 4.5. De seguida, faz-se uma representação gráfica com esse par de valores de temperatura, em função da carga, efetuando-se uma interpolação linear como mostrado na figura 4.8.



**Figura 4.8** - Representação gráfica de 2 pontos de temperatura em função da carga

Através do gráfico da figura anteriormente mencionada, e supondo que a evolução da temperatura em função da carga é aproximadamente linear, facilmente se obtêm os pontos de temperatura previstos para os restantes regimes de carga. De referir que, segundo a norma IEC 60034, para os pontos situados na zona de sobrecarga, esta considera que a respetiva temperatura é igual à temperatura obtida à plena carga. No entanto, como o que se verifica na realidade, é que a temperatura continua a aumentar conforme se aumenta a carga, optou-se por supor que, mesmo em sobrecarga, o crescimento da temperatura é linear, como mostra o gráfico da figura 4.9.

Com os valores de temperatura, para os diferentes regimes de carga, pela aplicação da expressão 4.2, facilmente se determinam as respetivas variações de temperatura. De seguida, pela aplicação da expressão 4.3, procede-se à sua correção, tendo como referência a temperatura ambiente de 25°C, com a determinação das temperaturas específicas de cada regime de carga.

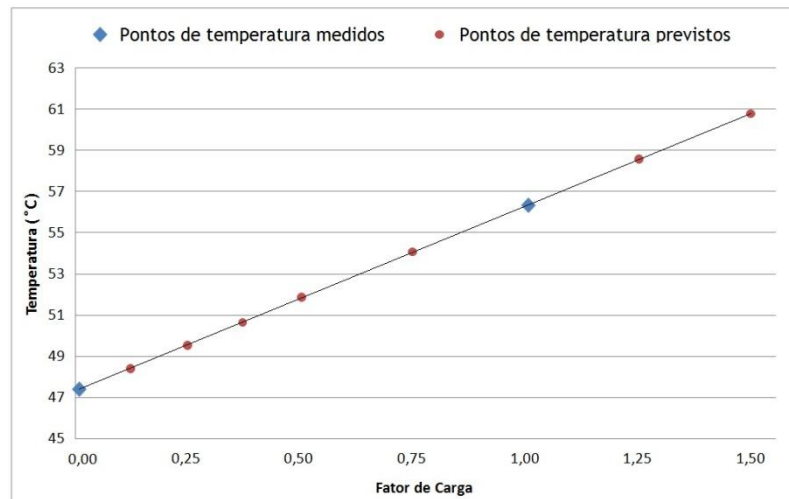


Figura 4.9 - Representação dos pontos previstos para os restantes regimes de carga

Por fim, com as temperaturas específicas de cada regime de carga, e tendo como referência o par de valores de temperatura - resistência medidos no ensaio inicial da medição da resistência a frio, procede-se ao cálculo das respetivas resistências estatóricas:

$$R_{corrigida\_i} = R_{amb\_inicial} \times \frac{(\theta_{corrigida\_i} + k_1)}{(\theta_{amb\_inicial} + k_1)} \quad (4.5)$$

onde

$R_{corrigida\_i}$  é a resistência corrigida para o regime de carga  $i$  ( $i=25\%$ ,  $50\%$ , etc.), em  $\Omega$

$\theta_{corrigida\_i}$  é a temperatura específica para o regime de carga  $i$  ( $i=25\%$ ,  $50\%$ , etc.), em  $^{\circ}\text{C}$

$R_{amb\_inicial}$  é a resistência medida no ensaio de medição da resistência a frio, em  $\Omega$

$\theta_{amb\_inicial}$  é a temperatura ambiente no ensaio de medição da resistência a frio, em  $^{\circ}\text{C}$

$k_1$  corresponde a 234,5 para o cobre recozido [43]



Estes valores de resistência corrigidos servirão para calcular as perdas no cobre, assim como o respetivo rendimento da máquina para os diversos regimes de carga, como se verá adiante.

#### **4.3.3 - Ensaio em Carga**

O ensaio em carga tem como principal objetivo a determinação do rendimento do motor. A máquina deverá ser acoplada a um freio para assim se proceder à aplicação de diversos regimes de carga. A norma específica que deverão ser aplicados, no mínimo, 4 regimes entre 25% e 100% de carga e 2 regimes acima da plena carga, nunca excedendo os 150%.

No total, a máquina foi ensaiada para 9 regimes de carga diferentes. Para além do regime nominal, ensaiou-se o motor para 125% e 150% da carga nominal. Em situação de carga parcial aplicaram-se os regimes comuns de 25%, 50% e 75%. Foram, ainda, aplicados regimes de carga de 0%, 12,5% e 37,5% para aumentar o número de pontos nesta zona, onde a evolução de algumas características de funcionamento, como acontece com o rendimento, normalmente, são não lineares. De referir que, para o fator de carga de 0%, o binário resistente aplicado ao motor não era exatamente nulo, apresentando, contudo, um valor bastante baixo. Nesta situação, o motor continuou acoplado ao freio, não se tratando do ensaio em vazio.

##### **4.3.3.1 - Grandezas Medidas**

No ensaio em carga realizado, as principais grandezas medidas foram a tensão, a frequência, a velocidade, a corrente, o binário e as potências registadas através da aplicação do método dos 2 wattímetros. Após o ensaio, foi realizada a medição da resistência pelo método voltímetro-amperímetro.

##### **4.3.3.2 - Procedimento experimental**

As leituras relativas ao ensaio em carga só deverão ser iniciadas a partir do momento em que, após o funcionamento à plena carga, seja atingido o equilíbrio térmico, para garantir que as respetivas medidas são efetuadas para a temperatura normal de funcionamento do motor.

Assim, e começando a aplicação dos diferentes regimes de carga por ordem decrescente, ou seja, de 150% até 0%, foram registados os valores de todas as grandezas a medir, o mais rápido possível. Este processo deve ser feito com relativa rapidez para que a variação da temperatura da máquina seja a menor possível. A norma descreve que a variação da temperatura durante este teste, não deve exceder os 10°C relativamente à temperatura medida no ensaio de temperatura à carga nominal,  $\theta_{medida}$ .

#### 4.3.4 - Determinação do Rendimento e das Perdas no Cobre

Finalizado o ensaio em carga, com o conjunto de medições efetuadas, procede-se ao cálculo das grandezas tais como potência ativa e reativa, potência mecânica, fator de potência, rendimento e potência de perdas. As perdas neste trabalho, foram apenas segregadas nas componentes de perdas óhmicas e não óhmicas.

##### 4.3.4.1 - Potência Ativa

A potência ativa absorvida pelo motor representa a componente de potência aparente que é transformada em potência mecânica. Esta foi calculada pelo método dos 2 wattímetros. A sua unidade é o watt (W).

$$P_{abs} = P_1 + P_2 \quad (4.6)$$

onde

$P_1$  é a potência ativa medida no wattímetro 1, em W

$P_2$  é a potência ativa medida no wattímetro 2, em W

##### 4.3.4.2 - Potência Reativa

A potência reativa absorvida pelo motor representa a componente de potência aparente que é responsável pela alimentação dos campos magnéticos necessários para a conversão da energia elétrica em energia mecânica. O seu cálculo foi obtido através das potências medidas pelo método dos 2 wattímetros. A sua unidade é o volt-ampère reativo (var).

$$Q = \sqrt{3} \times (P_1 - P_2) \quad (4.7)$$

onde

$P_1$  é a potência ativa medida no wattímetro 1, em W

$P_2$  é a potência ativa medida no wattímetro 2, em W

O cálculo da potência reativa pelo método dos 2 wattímetros parte do pressuposto que há equilíbrio entre fases. O que foi comprovado na prática.

##### 4.3.4.3 - Potência Mecânica

A potência mecânica,  $P_{mec}$ , é aquela que se encontra disponível no eixo do motor. Quando o motor funciona em regime nominal, esta potência deverá corresponder ao valor da potência que consta na chapa de características do mesmo. Em motores síncronos, esta só depende do binário e da velocidade. A sua unidade é o watt (W).

$$P_{mec} = \frac{2\pi \times n \times T}{60} \quad (4.8)$$

onde

$n$  é a velocidade de rotação do eixo, em r.p.m.

$T$  é o binário motor, em N.m.

Como o binário lido no dinamómetro presente no laboratório vem em kg.m, há a necessidade de o converter em N.m., para tal multiplica-se o valor medido pelo respetivo fator de conversão, que tem o valor de 9,80665.

#### 4.3.4.4 - Fator de Potência

O fator de potência é definido pela razão entre a potência ativa consumida pela máquina e a potência aparente da mesma. Este deve ser o mais elevado possível, o que acontece com o motor WQuattro, visto que os ímanes permanentes fornecem grande parte da energia magnética necessária para o funcionamento do motor. É adimensional, e o seu valor é calculado através das potências medidas pelo método dos 2 wattímetros.

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \left( \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right)^2}} \quad (4.9)$$

onde

$P_1$  é a potência ativa medida no wattímetro 1, em W

$P_2$  é a potência ativa medida no wattímetro 2, em W.

#### 4.3.4.5 - Perdas

O método A seguido, equivalente ao método direto da norma IEC, só prevê o cálculo das perdas no cobre. Estas dependem do valor da resistência dos enrolamentos e do quadrado da corrente. Para os diversos regimes de carga, as perdas no cobre são calculadas tendo como base a resistência corrigida para a temperatura ambiente de referência. Assim, as perdas por efeito de Joule são dadas por:

$$p_{joule} = 3 \times R_{corrigida} \times I_{abs}^2 \quad (4.10)$$

onde

$R_{corrigida}$  é a resistência média estatórica, por fase, corrigida, em  $\Omega$

$I_{abs}$  é a corrente absorvida, por fase, em A.

#### 4.3.4.6 - Rendimento

O rendimento é uma das características mais importantes a ter em conta durante a aquisição de um motor. Este traduz a razão entre a potência mecânica e a potência elétrica absorvida. Normalmente, o seu valor vem representado em %.

Antes de se proceder ao cálculo do rendimento, a potência elétrica absorvida deve ser corrigida para a temperatura específica de funcionamento. Assim, a potência absorvida corrigida, para a máquina a funcionar como motor, vem:

$$P_{abs\_c} = P_{abs} + P_c \quad (4.11)$$

onde

$P_{abs\_c}$  é a potência absorvida corrigida para a temperatura específica, em W

$P_{abs}$  é a potência absorvida medida, em W

$P_c$  é a quantidade de potência a somar para a devida correção, em W

A quantidade de potência, necessária para se proceder à correção da potência absorvida, corresponde à diferença entre a parcela de perdas calculada tendo como base a temperatura específica e a parcela de perdas calculadas tendo como base a temperatura medida, sendo determinada por:

$$P_c = 3 \times (R_{corrigida} - R_{medida}) \times I_{abs}^2 \quad (4.12)$$

onde

$R_{corrigida}$  é a resistência média estatórica, por fase, corrigida, em  $\Omega$

$R_{medida}$  é a resistência média estatórica, por fase, não corrigida, em  $\Omega$

$I_{abs}$  é a corrente absorvida, por fase, em A.

A resistência  $R_{medida}$ , para os diversos regimes de carga, corresponde à resistência dos enrolamentos à temperatura não corrigida, cujas temperaturas se encontram representadas no gráfico figura 4.9.

Por fim, determina-se o rendimento corrigido do motor pela aplicação da expressão:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{abs\_c}} \quad (4.13)$$

A norma sugere, ainda, um procedimento para correção da potência mecânica para compensar as perdas ocorridas pelo atrito dos rolamentos do dinamómetro. No entanto, esta correção não foi efetuada devido à necessidade da determinação da componente de perdas magnéticas. No entanto, o valor de binário de compensação a adicionar ao binário medido é muito reduzido, não alterando significativamente o valor da potência mecânica.

No caso do método seguido para o cálculo do rendimento ser o método B (equivalente ao método indireto da norma 60034), onde é efetuada a segregação das perdas nas suas diferentes componentes, o rendimento pode ser calculado em função da potência elétrica absorvida e das perdas pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{P_{abs} - \text{perdas}}{P_{abs}} \quad (4.14)$$

Seguidamente, é apresentado um fluxograma que resume o procedimento experimental a seguir, no caso do método selecionado, ser o método A da norma IEEE 112.

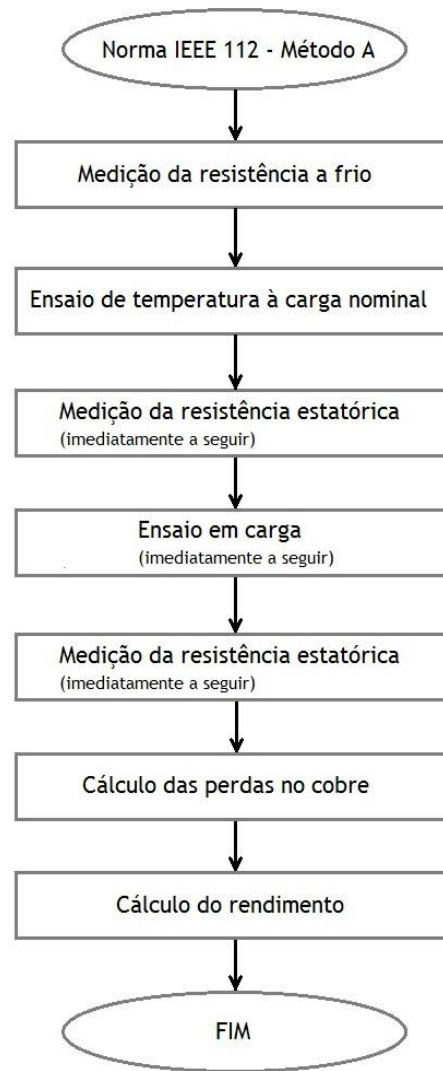


Figura 4.10 - Fluxograma do procedimento referente ao Método A da norma IEEE 112

#### 4. 4 - Fontes de Alimentação

O grande objetivo deste trabalho passa pelo estudo do comportamento das características de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes, quando lhe são impostas diferentes condições de alimentação. Deste modo, torna-se fundamental caracterizar as fontes de alimentação utilizadas durante a investigação experimental, evidenciando as características da onda da tensão de alimentação.

O motor *WQuattro* utilizado durante o estudo experimental, foi projetado para ser alimentado a partir de um sistema trifásico, simétrico e equilibrado, de tensões alternadas puramente sinusoidais. Contudo, nem sempre, condições de alimentação de qualidade satisfatória são garantidas, resultando num conjunto de efeitos negativos para o motor.

Com o crescente número de cargas não lineares ligadas à rede, a qualidade da onda de tensão e de corrente tem vindo a degradar-se, devido ao elevado conteúdo harmónico presente em torno da componente fundamental destas ondas, originando formas de onda de alimentação distorcidas. Esta distorção na forma de onda é responsável por causar sobreaquecimento no motor, provocando um rápido desgaste ao nível do isolamento e encurtando bastante o tempo de vida útil da máquina. Provoca, ainda, a redução do fator de potência e do rendimento, devido ao aumento das perdas. As correntes harmónicas originam, também, correntes induzidas nos enrolamentos amortecedores da gaiola rotórica, provocando vibrações mecânicas, contribuindo assim para um maior desgaste das partes mecânicas do motor.

Posto isto, as fontes de alimentação aplicadas ao motor, durante a atividade desenvolvida em laboratório, foram as seguintes:

- Rede pública: 400V/50Hz
- Gerador síncrono trifásico: 460V/60Hz
- Variador Eletrónico de Velocidade: 400V/50Hz

Seguidamente, são apresentadas as fontes de alimentação e as respetivas formas de onda, tanto de tensão como de corrente, que alimentaram o motor durante os diferentes ensaios. As formas de onda foram medidas imediatamente a montante dos terminais do motor, estando este a operar à plena carga.

#### **4.4.1 - Rede Pública: 400V/50Hz**

O primeiro ensaio foi realizado com o motor diretamente ligado à rede pública de distribuição em baixa tensão (BT). Apesar do motor síncrono de ímanes permanentes permitir o arranque direto, devido à presença da gaiola rotórica, este foi feito recorrendo a um autotransformador, minimizando assim os elevados esforços elétricos e mecânicos exigidos ao motor durante esta fase transitória.

Em Portugal, e na maior parte dos países da Europa, a tensão da rede pública de distribuição em BT, é caracterizada por ter uma variação temporal sinusoidal, sendo o seu valor eficaz de 230/400V (mono/trifásico) com uma frequência de 50Hz.

Na figura 4.11, encontra-se representada a forma de onda da tensão de alimentação e o respetivo espectro de frequências. Pela análise da figura, é possível verificar que a distorção da onda é mínima, visto que o seu conteúdo harmónico é baixo. O valor eficaz da tensão é de 401V e a sua frequência é de 50Hz, como esperado.

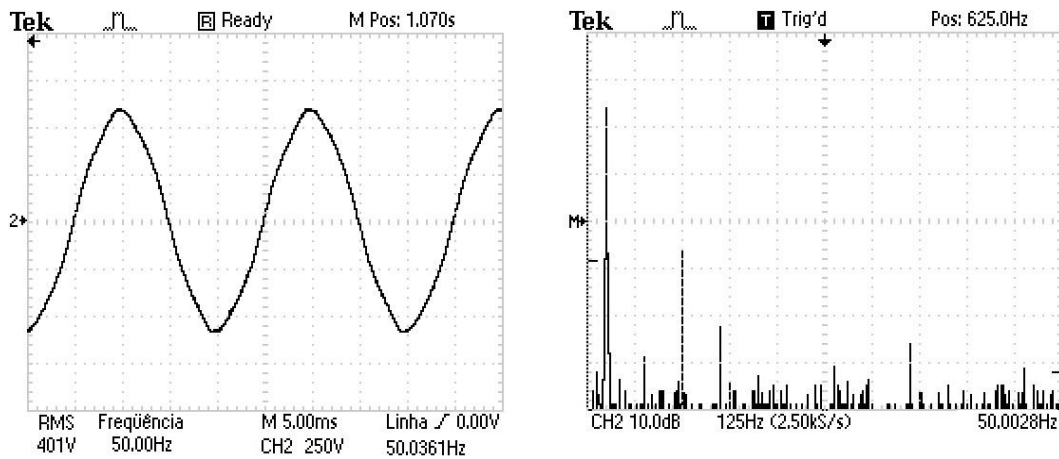


Figura 4.11 - Onda da tensão de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 400V/50Hz

A onda da corrente de alimentação encontra-se representada na figura 4.12. Este sinal foi medido com o motor a operar à plena carga, obtendo-se um valor eficaz de 9,03A à frequência de 49,98Hz. Como se pode verificar, o conteúdo harmónico é representativo, destacando-se os harmónicos de ordem 5, 7, 13, 17 e 19, originando uma onda de corrente distorcida.

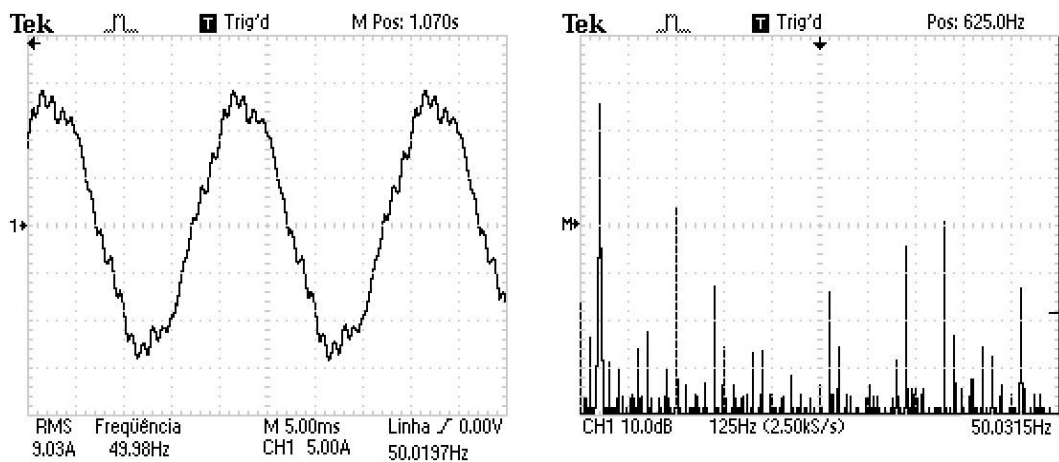


Figura 4.12 - Onda da corrente de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 400V/50Hz

#### 4.4.2 - Gerador Síncrono Trifásico: 460V/60Hz

O segundo ensaio teve como objetivo principal verificar o comportamento das características de funcionamento do motor, quando alimentado com um sistema trifásico de tensões similar àquele que se utiliza nos Estados Unidos da América.

Segundo a norma americana ANSI C84.1 de 2011, o nível da tensão nos EUA, para sistemas trifásicos, tem um valor eficaz de 460V para uma frequência de 60Hz [44]. Existem

outros níveis de tensão para sistemas trifásicos de baixa tensão, no entanto, o nível de 460V é aquele que maior aplicação industrial encontra.



Figura 4.13 - Grupo gerador e respetiva chapa de características

Na tentativa de simular um sistema trifásico de tensões idêntico, utilizou-se o grupo gerador que se encontra na figura 4.13. A máquina primária é um motor de indução trifásico que se encontra ligado a um VEV, permitindo assim regular a velocidade aplicada ao veio do gerador. O gerador é uma máquina síncrona trifásica, com 2 pares de pólos, de tensão nominal igual a 400V/50Hz. No entanto, como a tensão necessária era de 460V/60Hz, este foi acionado pela máquina primária a uma velocidade de 1800 r.p.m., sendo a tensão elevada para o nível de 460V através de um autotransformador.

Na figura 4.14, encontra-se representada a onda da tensão fornecida pelo gerador síncrono durante o ensaio em carga do motor. Esta encontra-se ligeiramente distorcida, sendo visível o aumento do conteúdo harmónico em comparação com a onda de tensão fornecida pela rede.

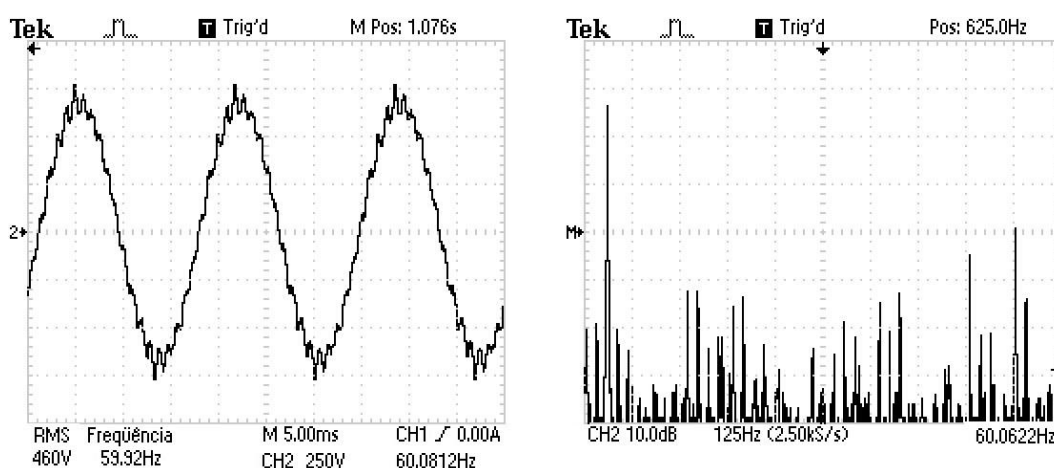


Figura 4.14 - Onda da tensão de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 460V/60Hz



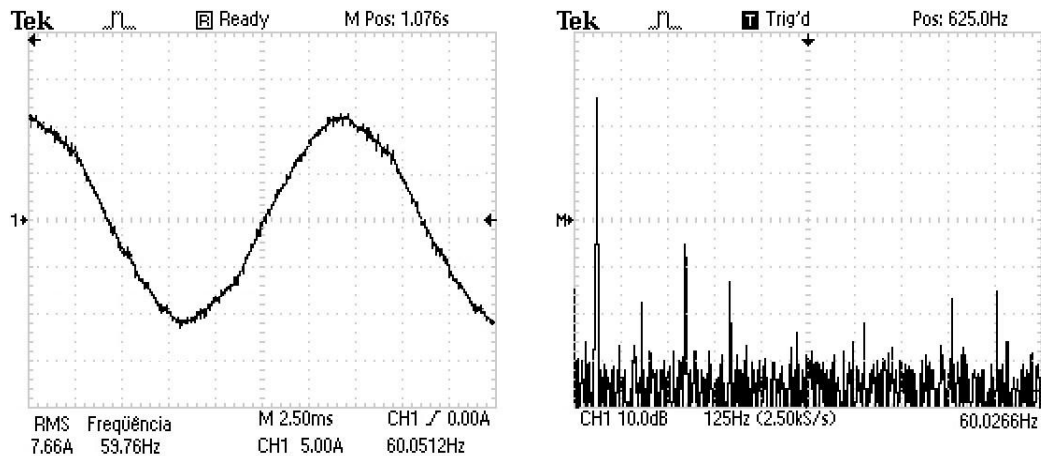


Figura 4.15 - Onda da corrente de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 460V/60Hz

A onda de corrente encontra-se representada na figura 4.15. Apesar da amplitude dos principais harmónicos ser menor em comparação com o conteúdo harmónico da onda da corrente quando a alimentação é feita pela rede, neste caso, existe uma maior taxa de inter harmónicos.

#### 4.4.3 - Variador Eletrónico de Velocidade: 400V/50Hz

O terceiro ensaio foi feito recorrendo à utilização de um variador eletrónico de velocidade da marca *EMERSON*, modelo SK2403. O controlo da velocidade de motores tem-se manifestado muito vantajoso na maioria dos acionamentos industriais, pelo que a aplicação de VEV's tem-se intensificado nos últimos anos. Perceber até que ponto é que a aplicação deste dispositivo pode influenciar o comportamento das características de funcionamento do motor WQuattro, tornou-se assim signficante.

Os VEV's com inversor por fonte de tensão e modulação por largura de impulso são os que mais se utilizam para o controlo de motores de indução [45], podendo também ser aplicados para o controlo da velocidade do motor síncrono de ímanes permanentes.

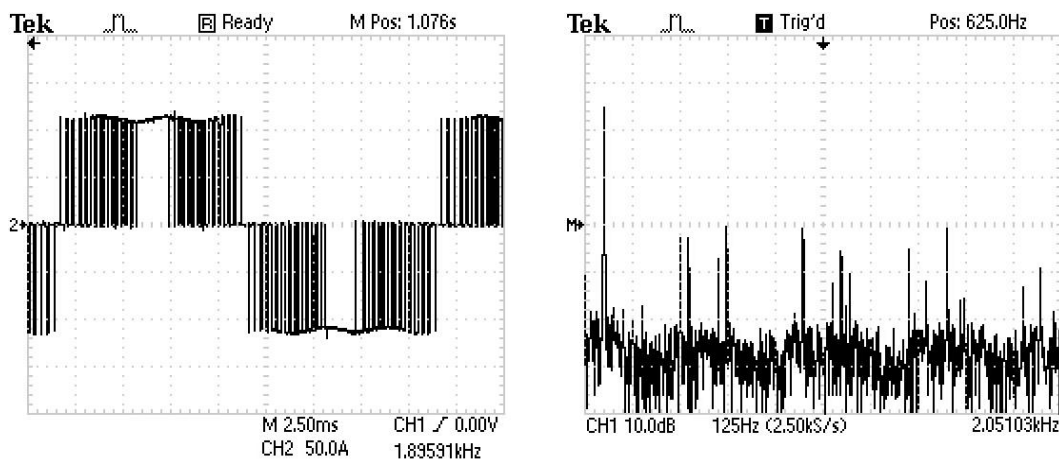


Figura 4.16 - Onda da tensão de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 400V/50Hz(VEV)

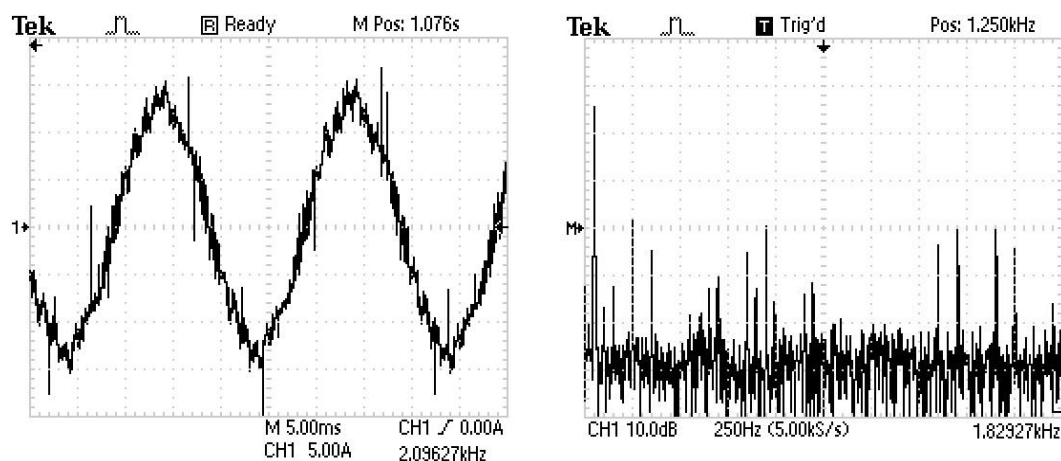


Figura 4.17 - Onda da corrente de alimentação e respetivo conteúdo harmónico - 400V/50Hz(VEV)

A tensão à saída do VEV utilizado no ensaio pode ser visualizada na figura 4.16. O seu espetro de frequências evidencia um elevado conteúdo harmónico.

Na figura 4.17 encontra-se a forma de onda da corrente fornecida pelo VEV ao motor quando este se encontrava a trabalhar à plena carga. Como se pode verificar, a onda apresenta um nível de distorção assinalável devido às correntes harmónicas de frequência múltipla da componente fundamental, resultantes da utilização deste tipo de aparelhos. Como dito anteriormente, estas correntes harmónicas causam um aumento das perdas óhmicas e das perdas magnéticas por correntes parasitas. Perturbações mecânicas são também típicas quando um elevado conteúdo harmónico se encontra presente nas ondas de tensão e corrente. Como se verá posteriormente, através da análise dos resultados obtidos em laboratório, o rendimento da máquina sofre uma redução aquando da alimentação com VEV.

## 4. 5 - Ensaio Laboratoriais

Neste ponto é efetuada a apresentação dos resultados obtidos através dos ensaios realizados no LME da FEUP. O procedimento experimental, como explicado anteriormente, baseou-se no método A da norma IEEE 112. Este método estabelece o procedimento laboratorial a seguir para determinar as características de funcionamento do motor em carga.

Desta forma, o principal objetivo da atividade experimental realizada foi obter o comportamento das características de funcionamento do motor, tais como o rendimento, o fator de potência, a potência ativa e reativa, a potência mecânica desenvolvida e as perdas, constantes e não constantes, para diversos regimes de carga.

Ao iniciar um ensaio num laboratório de máquinas elétricas, o primeiro passo deve ser feito no sentido de garantir todas as condições de segurança, tanto ao nível de pessoas como de equipamentos. Assim, inicialmente, foi feita uma abordagem visual da instalação e dos

equipamentos a utilizar durante os testes, colocando-se o motor em funcionamento, e testando-se alguns equipamentos, como a banca de controlo de excitação do freio e alguns aparelhos de medida.

Posto isto, foi feito o ensaio em carga com o motor ligado diretamente à rede pública de baixa tensão, seguindo-se aquele com alimentação sinusoidal a 460V/60Hz e, por fim, o ensaio com alimentação através de um VEV.

#### 4.5.1 - Ensaio em Carga com Alimentação através da Rede: 400V/50Hz

Após todas as condições de segurança terem sido reunidas, procedeu-se à montagem do circuito elétrico representado esquematicamente na figura 4.18. O autotransformador ligado entre a rede e o motor, serviu, essencialmente, para se proceder a um arranque não tão exigente como aquele feito pela ligação direta à rede. Terminada a montagem, iniciou-se o ensaio em carga.

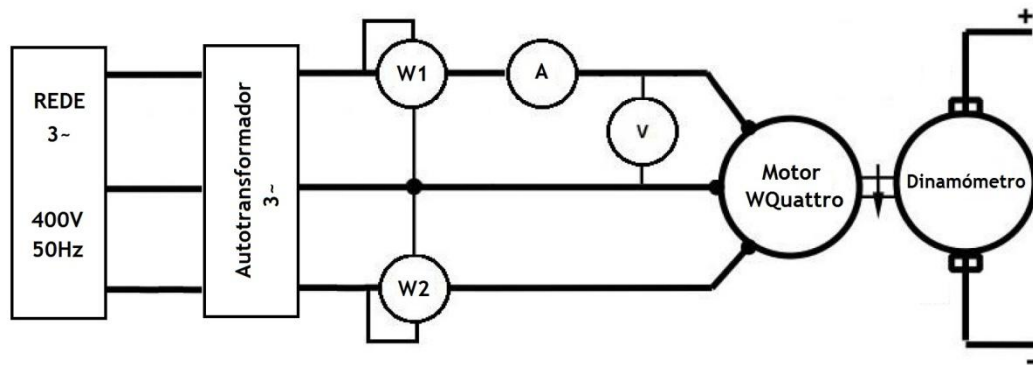


Figura 4.18 - Esquema elétrico do motor alimentado diretamente da rede - 400V/50Hz

A primeira fase, como explicado através do ponto que aborda o procedimento experimental seguido, foi a medição da resistência a frio através do método voltímetro-amperímetro, e da temperatura ambiente. Pela aplicação da expressão 4.4, obteve-se uma resistência média estatórica, por fase, de  $0,591\Omega$  à temperatura ambiente de  $17,1^{\circ}\text{C}$ . A temperatura média ambiente durante o ensaio foi de  $24,1^{\circ}\text{C}$ .

O ensaio de temperatura à carga nominal, após as leituras e cálculos necessários, permitiu obter os valores de resistência e temperatura para os diferentes regimes de carga, assim como os valores de resistência e temperatura corrigidos para a temperatura ambiente de referência, de  $25^{\circ}\text{C}$ . Estes resultados encontram-se na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores de temperatura/resistência dos enrolamentos do estator - 400V/50Hz

Fator de Carga	Valores medidos		Valores corrigidos	
	$\theta_{medida} (^{\circ}C)$	$R_{medida} (\Omega)$	$\theta_{corrigida} (^{\circ}C)$	$R_{corrigida} (\Omega)$
0,8	47,4	0,662	48,3	0,664
12,3	48,5	0,665	49,4	0,667
24,9	49,6	0,667	50,5	0,670
37,0	50,7	0,670	51,6	0,672
50,1	51,9	0,673	52,8	0,675
74,8	54,1	0,678	55,0	0,680
100,2	56,3	0,683	57,2	0,685
124,9	58,6	0,688	59,5	0,691
149,5	60,8	0,694	61,7	0,696

Como se pode verificar pela análise da tabela supracitada, os resultados da temperatura após a correcção,  $\theta_{corrigida}$ , apresentam uma variação pequena em comparação com os resultados obtidos pelas medições, visto que a temperatura média ambiente é muito próxima do valor de referência. Pode-se também verificar que a diferença entre a temperatura dos enrolamentos obtida para a situação de carga nominal e para a situação de carga mínima é inferior a 10°C, como prevê a norma.

Com os valores da temperatura corrigida (expressão 4.3), obtiveram-se os valores da respetiva resistência (expressão 4.5). Estes valores de resistência corrigida para a temperatura específica de funcionamento serviram para calcular as perdas no cobre e para fazer a correção necessária à potência ativa absorvida.

Na tabela 4.6, encontram-se os valores das grandezas medidas para os diferentes regimes de carga. É possível verificar-se que a onda da tensão fornecida pela rede, relativamente ao seu valor eficaz e frequência, permaneceu praticamente constante durante o ensaio. Assim, e sendo o motor WQuattro um motor síncrono com 2 pares de pólos, conclui-se que a velocidade verificada corresponde ao valor esperado de 1500rpm. O binário apresentado na tabela corresponde ao binário lido no mostrador de binário do dinamómetro. Assim, este binário corresponde ao binário resistente aplicado pelo freio ao eixo do motor. No entanto, como visto no capítulo 3, em regime permanente, o binário motor é igual ao binário resistente. A corrente absorvida, como seria de esperar, aumenta com a carga. Neste ensaio, o valor nominal de corrente obtido é de 9A, ligeiramente acima dos 8,8A referenciados pelo ensaio do fabricante (ver Anexo B), e ligeiramente abaixo dos 9,23A que se encontra registado na chapa de características do motor. As potências P1 e P2 correspondem às potências medidas pelo método dos 2 wattímetros.

Tabela 4.6 - Valores das grandezas medidas no ensaio em carga - 400V/50Hz

Fator de Carga	U (V)	f(Hz)	n (rpm)	T (N.m.)	I (A)	P1(W)	P2(W)
0,8%	400	50,03	1500	0,29	3,68	-516	840
12,3%	400	50,03	1500	4,31	3,23	-20	980
24,9%	401	50,03	1500	8,73	3,38	460	1196
37,0%	401	49,99	1500	12,94	3,96	864	1460
50,1%	401	49,98	1500	17,55	4,82	1288	1776
74,8%	400	49,98	1500	26,18	6,78	2032	2448
100,2%	400	49,99	1500	35,11	9	2748	3228
124,9%	401	49,99	1500	43,74	11,1	3380	4100
149,5%	400	49,98	1500	52,37	13,4	3988	5048

Na tabela 4.7, são apresentados os valores das grandezas calculadas para os diversos regimes de carga. É de destacar, o elevado rendimento obtido em torno do regime nominal, alcançando os 92,3% à plena carga, confirmando, desta forma, o valor de rendimento apresentado pelo fabricante na tabela de ensaios que se encontra no Anexo B. O fator de potência é também bastante elevado, atingindo o valor de 0,99 (indutivo) à plena carga. Segundo o ensaio do fabricante, à carga nominal, o fator de potência atingiu os 0,98. Apesar desta ligeira diferença, pode-se concluir que o fator de potência, quando o motor trabalha acima dos 50% da carga nominal, é bastante elevado, não contribuindo desta forma para a degradação da qualidade da energia da instalação onde o motor se encontra aplicado e, não agravando os custos com a energia reativa, que, em Portugal, é taxada a partir dos 0,96.

Tabela 4.7 - Valores das grandezas calculadas no ensaio em carga - 400V/50Hz

Fator de Carga	P <sub>abs_c</sub> (W)	P <sub>mec</sub> (W)	$\eta$ (%)	$\cos \varphi$	Q <sub>abs</sub> (var)	P <sub>totais</sub> (W)	P <sub>joule</sub> (W)	P <sub>n_joule</sub> (W)
0,8%	324	46	14,3%	0,137	2349	277,9	27,0	250,9
12,3%	960	678	70,6%	0,485	1732	282,3	20,9	261,4
24,9%	1656	1371	82,8%	0,792	1275	285,1	22,9	262,1
37,0%	2324	2033	87,5%	0,914	1032	290,7	31,6	259,1
50,1%	3064	2757	90,0%	0,964	845	306,7	47,0	259,7
74,8%	4480	4113	91,8%	0,987	721	367,3	93,8	273,5
100,2%	5977	5515	92,3%	0,990	831	461,7	165,8	295,9
124,9%	7481	6871	91,8%	0,986	1247	610,4	264,5	345,8
149,5%	9037	8226	91,0%	0,980	1836	811,2	391,8	419,4

Seguidamente, é efetuada uma análise gráfica das características de funcionamento do motor, quando em carga, para se perceber melhor a evolução das mesmas em função do regime de carga aplicado.

Na figura 4.19 encontra-se representada graficamente a evolução da corrente absorvida pelo motor em função da carga. Como se pode verificar, inicialmente, a corrente mantém-se aproximadamente constante à medida que se aumenta o binário resistente aplicado ao motor. Isto deve-se ao facto de, apesar do aumento da componente ativa da corrente para atender ao aumento da potência mecânica necessária para criar o binário motor, haver um rápido decréscimo da componente reativa da corrente à medida que a carga vai aumentando. A partir dos 25% de carga o aumento da corrente absorvida é feito de forma aproximadamente linear.

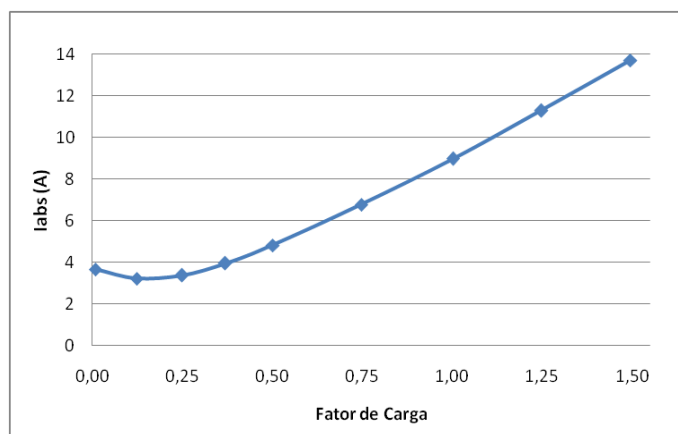


Figura 4.19 - Evolução da corrente absorvida em função da carga - 400V/50Hz

Como se pode verificar pela análise da figura 4.20, que mostra a evolução da potência ativa e da potência reativa, inicialmente, a potência reativa é bastante elevada face à potência ativa absorvida, originando um baixo fator de potência, pelo que o motor nunca deve operar sob tais condições de carga. Com o aumento da carga, a componente ativa da potência tem um aumento aproximadamente linear, distanciando-se dos baixos valores para os quais o motor não deve trabalhar, melhorando o fator de potência.

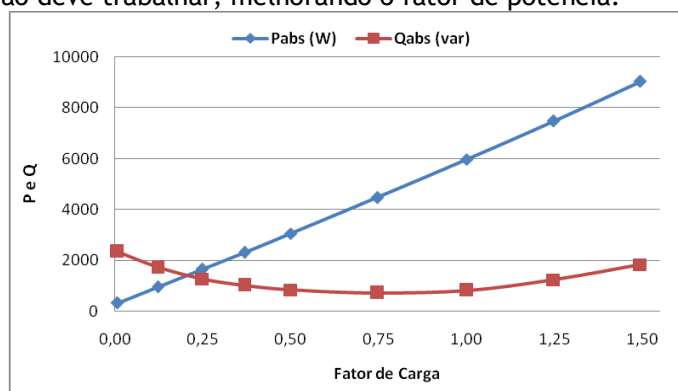
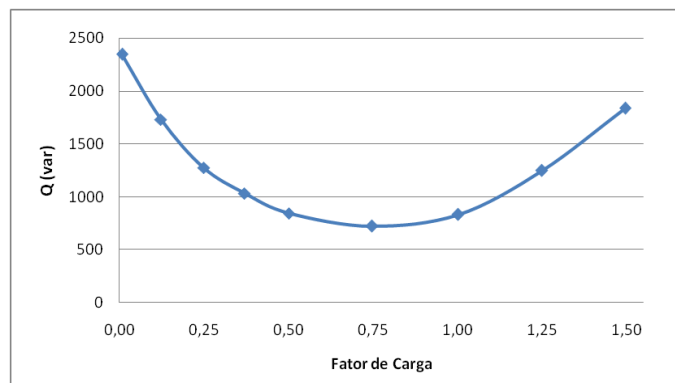


Figura 4.20 - Evolução das potências P e Q em função da carga - 400V/50Hz

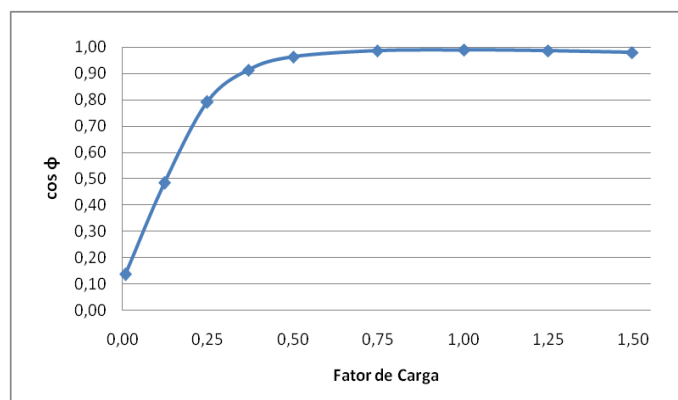
Para perceber melhor o comportamento da componente reativa da potência, é apresentado o gráfico da figura 4.21. Através da sua análise, é possível verificar que a potência reativa é sempre positiva, antevendo um fator de potência sempre indutivo para as condições de alimentação pré-estabelecidas. Para baixos fatores de carga, à medida que se vai aumentando a carga, o efeito magnetizante do campo magnético de reação do induzido, que se compõe com o campo originado pelos ímanes, vai aumentando, fazendo baixar a componente reativa da potência necessária para alimentar o campo magnético necessário à conversão eletromecânica da energia. A partir dos 75% da carga nominal, o campo magnético originado pelos ímanes permanentes deixa de ser suficiente, tendo o motor a necessidade de absorver uma maior quantidade de energia reativa à medida que a carga vai aumentando.



**Figura 4.21** - Evolução da potência reativa em função da carga - 400V/50Hz

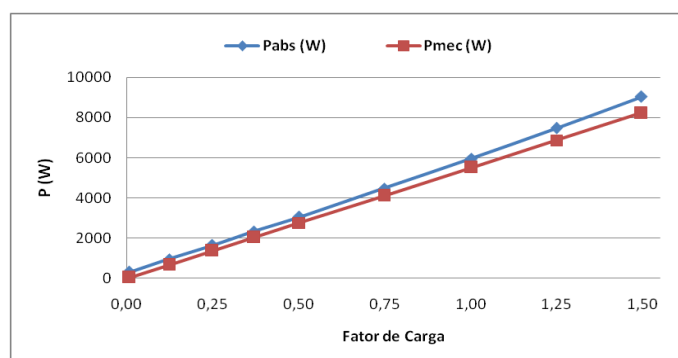
No gráfico da figura 4.22, pode ser visualizado o comportamento do fator de potência com o aumento da carga. Como visto anteriormente, para baixos regimes de carga e à medida que a carga vai aumentando, a potência reativa absorvida decai bruscamente, enquanto a potência ativa vai aumentando. Estas razões justificam o facto do fator de potência ter um crescimento acentuado, para baixos regimes de carga, estabilizando a partir dos 50% da carga em valores bastante elevados (0,98 - 0,99).

O fator de potência é uma das características mais importantes a ter em conta aquando da compra de um motor. Um motor com baixo fator de potência irá absorver uma elevada percentagem de energia reativa, prejudicando não só a rede mas, também, a instalação na qual o motor se encontra instalado, aumentando as perdas e diminuindo a capacidade de transporte de energia ativa nas linhas. Para além destas consequências negativas mencionadas, o preço a pagar pelo consumo da energia reativa pode ser elevado se o fator de potência da instalação for menor que o valor estipulado por lei. A compensação de fator de potência pode ser uma boa medida, no entanto, trará sempre custos adicionais. Posto isto, o motor síncrono de ímanes permanentes *WQuattro* enquadra-se como uma excelente solução para combater o excessivo consumo de energia reativa por parte de alguns motores de indução existentes no setor industrial.



**Figura 4.22** - Evolução do fator de potência em função da carga - 400V/50Hz

Seguidamente, na figura 4.23, é apresentada a evolução da potência mecânica útil e da potência elétrica absorvida face ao aumento da carga. Pela sua análise, conclui-se que a potência mecânica tem um crescimento linear, acompanhando o crescimento da potência absorvida. Para os diferentes regimes de carga, a diferença entre a potência elétrica e a potência obtida no eixo, traduz-se pela componente de perdas que ocorre na máquina. Como se sabe, as perdas devem ser minimizadas ao máximo para se obterem motores cada vez mais eficientes do ponto de vista energético. No gráfico, é possível verificar-se que com o aumento de carga, a distância entre a curva da potência mecânica e a curva da potência absorvida vai aumentando, antevendo um aumento das perdas ocorridas no motor.



**Figura 4.23** - Evolução das potências mecânica e elétrica em função da carga - 400V/50Hz

A evolução das perdas ocorridas no motor encontra-se representada na figura 4.24. É possível concluir que a componente total de perdas é aproximadamente constante para baixos regimes de carga, começando a aumentar parabolicamente a partir dos 50% da carga. Isto deve-se ao facto de que, para além do aumento da componente de perdas no cobre, existe um aumento das restantes componentes de perdas, embora mais lento, à medida que a carga aumenta. Especificamente, é possível confirmar que as perdas por efeito de Joule nunca são constantes. A expressão 4.10 permite perceber que estas variam com a resistência e o quadrado da corrente. Portanto, à medida que se aumenta a carga as perdas por efeito



de Joule aumentam sempre e de forma quadrática. No caso das perdas não Joule, a análise gráfica permite concluir que estas são aproximadamente constantes até à plena carga, começando a aumentar a partir daí.

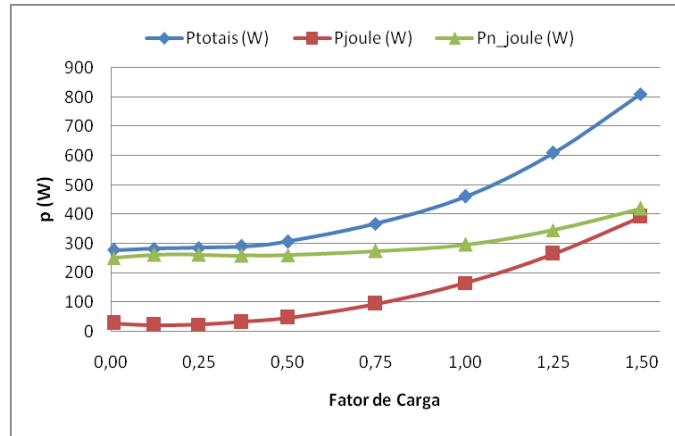


Figura 4.24 - Evolução das perdas em função da carga - 400V/50Hz

Por fim, é efetuada a análise gráfica da curva característica de rendimento, uma das características mais importantes, à qual os fabricantes têm dado grande importância face à crescente preocupação com a utilização racional da energia. O rendimento do motor *WQuattro* figura-se como uma característica de excelência, sendo dos poucos motores que, atualmente, excedem a classe *Super Premium* de eficiência energética ditada pela norma IEC 60034. Tal característica encontra-se representada graficamente na figura 4.25, permitindo concluir que o rendimento da máquina é muito elevado entre os regimes mais comuns de funcionamento. Desde 50% da carga até à carga nominal, o rendimento nunca é inferior a 90%, chegando aos 92,3% à plena carga. Uma análise geral à maioria dos motores de indução de potência nominal aproximada à do motor *WQuattro* em estudo permite concluir que são poucos aqueles que aproximam o seu rendimento deste valor.

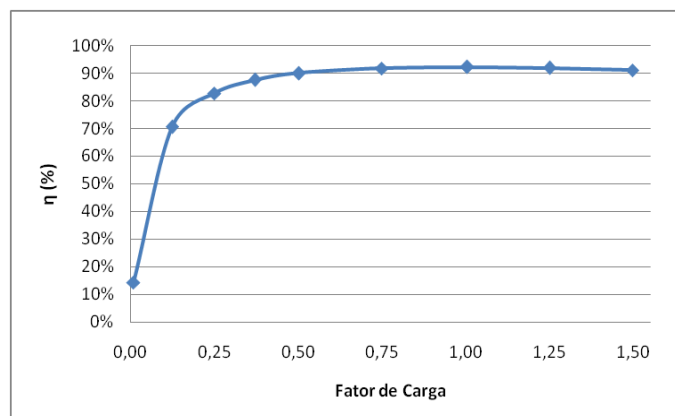


Figura 4.25 - Evolução do rendimento em função da carga - 400V/50Hz

Esta superioridade da característica de rendimento deve-se, sobretudo, à diminuição do valor das perdas ocorridas no motor, conseguida através da eliminação dos enrolamentos rotóricos, do uso de melhores materiais, da inclusão dos ímanes permanentes de alto produto energético na estrutura rotórica e, globalmente, da otimização de um projeto que conjuga todos esses fatores.

#### 4.5.2 - Ensaio em Carga com Alimentação através do Gerador Síncrono: 460V/60Hz

Neste ensaio, o motor foi alimentado com uma tensão eficaz de 460V e frequência de 60Hz. Primeiramente, procedeu-se à montagem do circuito elétrico representado esquematicamente na figura 4.26.

A tensão à saída do gerador apresentava um valor eficaz de 400V e frequência de 60Hz, pelo que, teve de se proceder à montagem de um autotransformador à saída deste para, assim, elevar o valor eficaz da tensão para os 460V.

Terminada a montagem, iniciou-se o ensaio com a medição da resistência a frio e da temperatura ambiente. Pela aplicação da expressão 4.4, obteve-se uma resistência média estatórica, por fase, de  $0,588\Omega$  à temperatura ambiente de  $16,5^{\circ}\text{C}$ . A temperatura média ambiente durante o ensaio foi de  $22,7^{\circ}\text{C}$ .

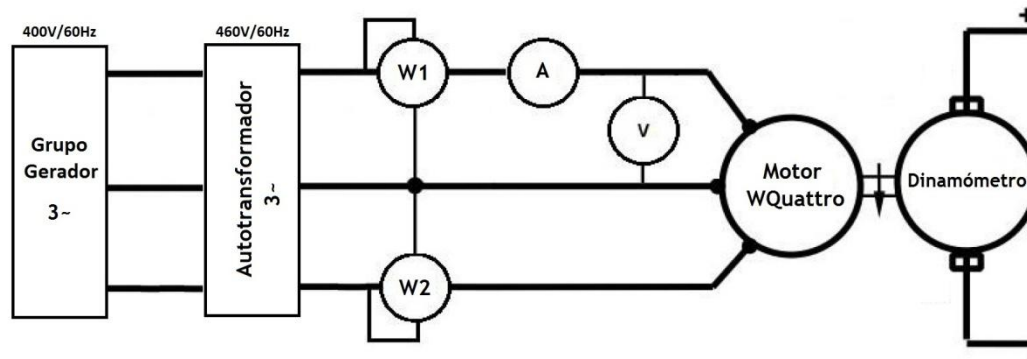


Figura 4.26 - Esquema elétrico do motor alimentado por um gerador síncrono - 460V/60Hz

Passou-se para o ensaio de temperatura à carga nominal e, após as leituras e respetivos cálculos, obtiveram-se os valores de resistência e temperatura, medidos e corrigidos, para os diferentes regimes de carga. Estes resultados encontram-se na tabela 4.8.

**Tabela 4.8** - Valores de temperatura/resistência dos enrolamentos do estator - 460V/60Hz

Fator de Carga	Valores medidos		Valores corrigidos	
	$\Theta_{medida} (^{\circ}C)$	$R_{medida}(\Omega)$	$\Theta_{corrigida} (^{\circ}C)$	$R_{corrigida}(\Omega)$
1,7%	45,1	0,656	47,4	0,661
11,4%	46,3	0,658	48,6	0,664
24,2%	47,5	0,661	49,8	0,667
38,3%	48,7	0,664	51,0	0,669
50,1%	49,8	0,667	52,1	0,672
74,6%	52,2	0,672	54,5	0,678
100,1%	54,6	0,678	56,9	0,683
125,0%	57,0	0,683	59,3	0,689
147,8%	59,3	0,689	61,6	0,694

Como seria de esperar, visto que a temperatura média ambiente durante o ensaio é inferior à temperatura de referência de 25°C, os resultados após a correção, apresentam uma pequena variação positiva. Verifica-se, ainda, que a diferença entre a temperatura dos enrolamentos obtida para a situação de carga nominal e para a situação de carga mínima, é inferior a 10°C, como prevê a norma.

Comparando com as temperaturas obtidas no ensaio com fonte de alimentação de 400V/50Hz (rede), mesmo depois de corrigidas, pode-se verificar que estas são ligeiramente inferiores, pois a corrente absorvida em função da carga é menor, implicando menor nível de perdas por efeito de Joule, ou seja, menor nível de calor libertado. A maior velocidade de rotação também reforça a refrigeração.

Na tabela 4.9, encontram-se os valores das grandezas medidas para os diferentes regimes de carga. É possível verificar-se que a onda de alimentação fornecida pelo gerador síncrono/autotransformador permaneceu dentro dos valores desejados. O binário resistente aplicado pelo freio ao eixo do motor, para cada regime de carga, é menor quando comparado com os valores do ensaio anterior. Como se sabe, o binário em máquinas síncronas depende da potência mecânica e da velocidade de rotação, que, neste caso, como foi aumentada para 1800rpm, teve de se baixar o binário aplicado para, assim, se manter a potência útil para cada regime de carga. A corrente absorvida é agora menor, visto que a tensão aumenta. O valor nominal obtido foi de 7,62A, bem abaixo dos 9A obtidos no ensaio anterior, que como se verá posteriormente, terá um reflexo positivo nas perdas óhmicas. As potências P1 e P2 correspondem às potências medidas pelo método dos 2 wattímetros.

**Tabela 4.9** - Valores das grandezas medidas no ensaio em carga - 460V/60Hz

Fator de Carga	U (V)	f(Hz)	n (rpm)	T (N.m.)	I (A)	P1(W)	P2(W)
1,7%	460	60,03	1800	0,49	2,77	-440	872
11,4%	460	60,01	1800	3,33	2,52	0	980
24,2%	460	60,05	1800	7,06	2,69	488	1208
38,3%	460	59,99	1800	11,18	3,33	980	1500
50,1%	460	60,04	1800	14,61	3,95	1368	1768
74,6%	460	60,01	1800	21,77	5,6	2140	2392
100,1%	460	60,03	1800	29,22	7,62	2872	3144
125,0%	460	60,04	1800	36,48	9,45	3592	3936
147,8%	460	59,99	1800	43,15	11,1	4160	4768

Na tabela 4.10, são apresentados os valores das grandezas calculadas para os diversos regimes de carga. Como se pode verificar, o rendimento à plena carga permanece elevado, atingindo os 91,6%. No entanto, este baixou 0,7 pontos percentuais comparativamente com aquele obtido no ensaio anterior. Relativamente ao fator de potência, atingiu um valor máximo de 0,997 à plena carga, o que evidencia que a componente de potência reativa absorvida é bastante baixa.

As restantes grandezas serão analisadas na secção seguinte, através da análise conjunta dos resultados de todos os ensaios. Será, também, feita uma comparação gráfica, não se justificando, aqui, a análise gráfica em particular para este ensaio, visto que a evolução das diferentes características é similar para todos os ensaios.

**Tabela 4.10** - Valores das grandezas calculadas no ensaio em carga - 460V/60Hz

Fator de Carga	P <sub>abs_c</sub> (W)	P <sub>mec</sub> (W)	$\eta$ (%)	$\cos \varphi$	Q <sub>abs</sub> (var)	P <sub>totais</sub> (W)	P <sub>joule</sub> (W)	P <sub>n_joule</sub> (W)
1,7%	432	92	21,4%	0,187	2272	339,7	15,2	324,5
11,4%	980	629	64,1%	0,500	1697	351,6	12,6	338,9
24,2%	1696	1331	78,5%	0,806	1247	365,2	14,5	350,7
38,3%	2480	2107	85,0%	0,940	901	372,8	22,3	350,5
50,1%	3136	2754	87,8%	0,976	693	381,9	31,5	350,4
74,6%	4533	4104	90,5%	0,995	436	428,7	63,8	364,9
100,1%	6017	5509	91,6%	0,997	471	508,2	119,0	389,2
125,0%	7529	6877	91,3%	0,997	596	652,8	184,6	468,3
147,8%	8930	8134	91,1%	0,993	1053	796,4	256,7	539,7

#### 4.5.3 - Ensaio em Carga com Alimentação através de VEV: 400V/50Hz

Neste ensaio, o motor foi alimentado através de um VEV, para uma tensão de 400V/50Hz. Procedeu-se à montagem do circuito elétrico representado esquematicamente na figura 4.26. Ao arrancar o motor, sentiu-se imediatamente a diferença entre o arranque assíncrono realizado nos ensaios anteriores com autotransformador e o arranque síncrono realizado com o VEV. Assim, no arranque, este aparelho pôs em evidência uma das suas grandes vantagens, que se traduz num arranque suave, exigindo um esforço muito menor por parte do motor, quer ao nível elétrico, quer ao nível mecânico.

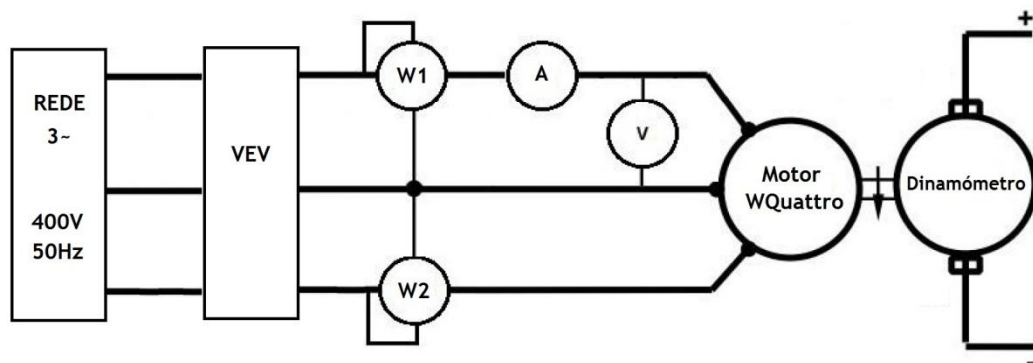


Figura 4.27 - Esquema elétrico do motor alimentado através de um VEV - 400V/50Hz

Posto isto, iniciou-se o ensaio de medição da resistência a frio. Pela aplicação da expressão 4.4, obteve-se uma resistência média estatórica, por fase, de  $0,589\Omega$  à temperatura ambiente de  $16,8^{\circ}\text{C}$ . A temperatura média ambiente durante o ensaio foi de  $23,1^{\circ}\text{C}$ .

Seguiu-se o ensaio de temperatura à carga nominal obtendo-se os valores de resistência e temperatura, medidos e corrigidos, para os diferentes regimes de carga, que se encontram na tabela 4.11. Mais uma vez, visto que a temperatura média ambiente obtida durante o ensaio era inferior à temperatura de referência de  $25^{\circ}\text{C}$ , os resultados após a correcção, apresentam uma pequena variação positiva. Verifica-se, ainda, que a diferença entre a temperatura dos enrolamentos obtida para a situação de carga nominal e para a situação de carga mínima, é inferior a  $10^{\circ}\text{C}$ , como prevê a norma.

Comparando com as temperaturas obtidas nos ensaios anteriores, pode-se concluir que as deste ensaio são superiores, pois a corrente absorvida em função da carga é ligeiramente superior. O maior nível de conteúdo harmónico presente, tanto na onda de tensão como de corrente, são também responsáveis por um aumento das perdas, inclusive as perdas por efeito de Joule, que contribuem para um aumento do aquecimento da máquina.

Tabela 4.11 - Valores de temperatura/resistência dos enrolamentos do estator - 400V/50Hz (VEV)

Fator de Carga	Valores medidos		Valores corrigidos	
	$\Theta_{medida} (^{\circ}C)$	$R_{medida}(\Omega)$	$\Theta_{corrigida} (^{\circ}C)$	$R_{corrigida}(\Omega)$
2,0%	49,2	0,666	51,1	0,670
12,6%	50,2	0,668	52,1	0,672
25,2%	51,3	0,670	53,2	0,675
37,5%	52,3	0,673	54,2	0,677
50,1%	53,4	0,675	55,3	0,680
74,8%	55,5	0,680	57,4	0,685
101,1%	57,6	0,685	59,5	0,690
124,3%	59,6	0,690	61,5	0,694
148,7%	61,7	0,695	63,6	0,699

Na tabela 4.12, encontram-se os valores das grandezas medidas para os diferentes regimes de carga. Relativamente à onda de alimentação fornecida pelo VEV, visto que este funciona em malha aberta, não havendo assim realimentação, houve a necessidade de se ir corrigindo a frequência através da velocidade medida no dinamómetro.

A corrente absorvida à plena carga foi de 9,15A. As potências P1 e P2 correspondem às potências medidas pelo método dos 2 wattímetros. Na tabela 4.13, são apresentados os valores das grandezas calculadas para os diversos regimes de carga. Como se pode verificar, o rendimento à plena carga atingiu os 90,5%, tendo baixado quase 2 pontos percentuais face ao ensaio com alimentação direta da rede. Relativamente ao fator de potência, atingiu um valor máximo de 0,991 à plena carga, tornando a evidenciar-se uma vantagem da utilização deste tipo de dispositivo, que se prende com a melhoria do fator de potência.

Tabela 4.12 - Valores das grandezas medidas no ensaio em carga - 400V/50Hz (VEV)

Fator de Carga	U (V)	f(Hz)	n (rpm)	T (N.m)	I (A)	P1(W)	P2(W)
2,0%	400	50	1500	0,69	3,3	-400	912
12,6%	400	50	1500	4,41	3,17	-8	1108
25,2%	400	50	1500	8,83	3,27	472	1320
37,5%	400	50	1500	13,14	3,9	908	1580
50,1%	400	50	1500	17,55	4,65	1344	1848
74,8%	400	50	1500	26,18	6,75	2112	2500
101,1%	400	50	1500	35,40	9,15	2832	3312
124,3%	400	50	1500	43,54	11,3	3488	4112
148,7%	400	50	1500	52,07	13,85	4080	5064

Tabela 4.13 - Valores das grandezas calculadas no ensaio em carga - 400V/50Hz (VEV)

Fator de Carga	$P_{abs,c}$ (W)	$P_{mec}$ (W)	$\eta$ (%)	$\cos \varphi$	$Q_{abs}$ (var)	$P_{totais}$ (W)	$P_{joule}$ (W)	$P_{n,joule}$ (W)
2,0%	512	108	21,1%	0,220	2272	404,3	21,9	382,4
12,6%	1100	693	63,0%	0,495	1933	406,9	20,3	386,6
25,2%	1792	1386	77,4%	0,773	1469	405,7	21,6	384,1
37,5%	2488	2064	83,0%	0,906	1164	424,0	30,9	393,1
50,1%	3192	2757	86,4%	0,965	873	434,8	44,1	390,7
74,8%	4613	4113	89,2%	0,990	672	499,5	93,6	406,0
101,1%	6145	5561	90,5%	0,991	831	584,0	173,2	410,8
124,3%	7602	6840	90,0%	0,990	1081	762,0	266,0	496,0
148,7%	9147	8180	89,4%	0,983	1704	966,7	402,5	564,2

Após a apresentação dos principais resultados obtidos experimentalmente, será efetuada uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos três ensaios. Esta análise permitirá tirar conclusões quanto à flexibilidade da máquina quando alimentada com fontes de alimentação diferentes daquela para o qual foi dimensionada.

## 4. 6 - Análise comparativa

Nesta secção do 4º capítulo é feita uma análise comparativa das principais características de funcionamento obtidas nos três ensaios que envolveram os três tipos de fontes de alimentação distintas.

### 4.6.1 - Corrente Absorvida

Neste ponto, é feita a comparação entre as curvas de corrente obtidas nos três ensaios, em função da carga. Estas curvas encontram-se representadas no gráfico da figura 4.28. Pela análise deste gráfico, é possível concluir que a evolução da corrente absorvida é semelhante, sofrendo um crescimento praticamente linear à medida que a carga aumenta.

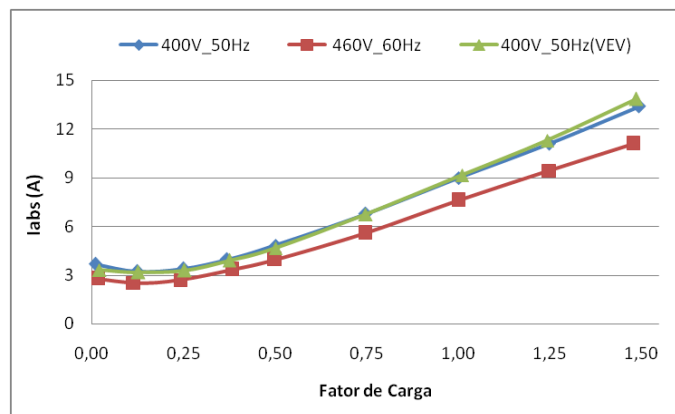


Figura 4.28 - Comparação das curvas características da corrente em função da carga

Pode-se concluir que a corrente absorvida pelo motor quando alimentado com a fonte de 460V/60Hz é sempre inferior quando comparada com os valores das curvas relativas às outras fontes, contribuindo para menores valores de perdas por efeito de Joule. Para a frequência de 50Hz, com VEV, os valores são idênticos aos da alimentação direta da rede, embora com tendência para serem ligeiramente superiores nos regimes de baixa carga e sobrecarga.

#### 4.6.2 - Fator de Potência

O fator de potência é uma das características mais importantes de um motor. Um baixo fator de potência tem consequências negativas não só para o motor mas também para a instalação na qual ele se encontra. Na figura 4.29 é feita a comparação entre as curvas obtidas nos diferentes ensaios.

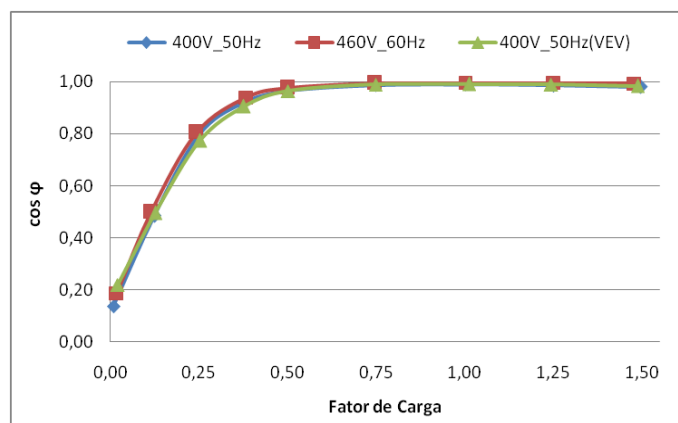


Figura 4.29 - Comparação das curvas características do fator de potência em função da carga

À primeira vista, é possível concluir que a evolução das curvas obtidas em função da carga é muito semelhante, não sendo aconselhável operar com o motor abaixo de 50% da carga nominal. Acima desse valor de carga, este tem um comportamento praticamente constante, sendo muito próximo de 1.

No entanto, uma análise mais cuidada permite evidenciar diferenças entre as três curvas, como se pode concluir pela análise do gráfico da figura 4.30. Comparativamente, a curva obtida no ensaio com alimentação através da fonte de 460V/60Hz, é caracterizada por valores superiores. Como, neste caso, o motor trabalha um pouco mais abaixo da zona de saturação magnética do ciclo de histerese, a potência reativa absorvida será menor, como se pode analisar pelo gráfico representado na figura 4.31, proporcionando, assim, um maior fator de potência.



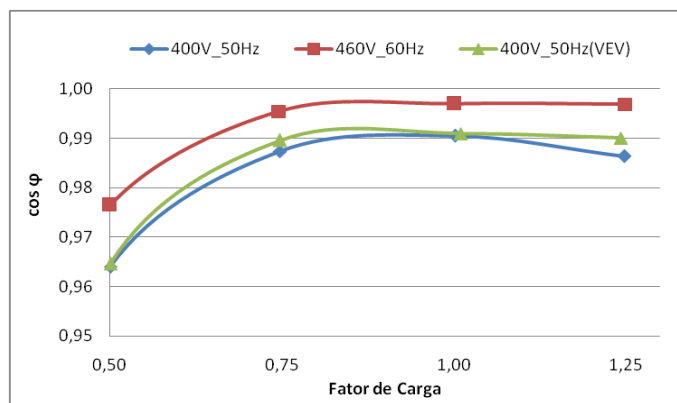


Figura 4.30 - Comparação das curvas características do fator de potência em função da carga

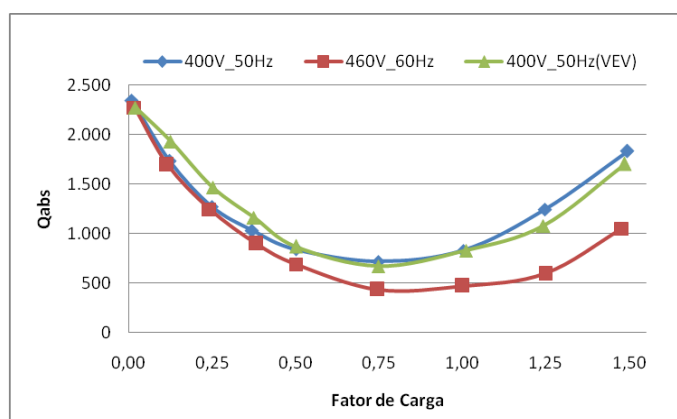


Figura 4.31 - Comparação das curvas características da potência reativa em função da carga

#### 4.6.3 - Rendimento

O rendimento é a característica de funcionamento que faz do motor *WQuattro* um motor de excelência quanto à sua eficiência energética. Assim, torna-se fundamental perceber como esta característica é afetada, quando o motor é alimentado por diferentes fontes de alimentação.

O rendimento depende fundamentalmente das perdas que ocorrem na máquina. Assim, quanto maior for o rendimento, menores são as perdas que ocorrem durante o processo de conversão da energia elétrica em energia mecânica. Nas figuras 4.32 e 4.33 encontram-se as curvas características do rendimento em função da carga para os três ensaios, em que o gráfico da figura 4.33 é uma espécie de ‘zoom’ do primeiro, para os principais regimes de carga.

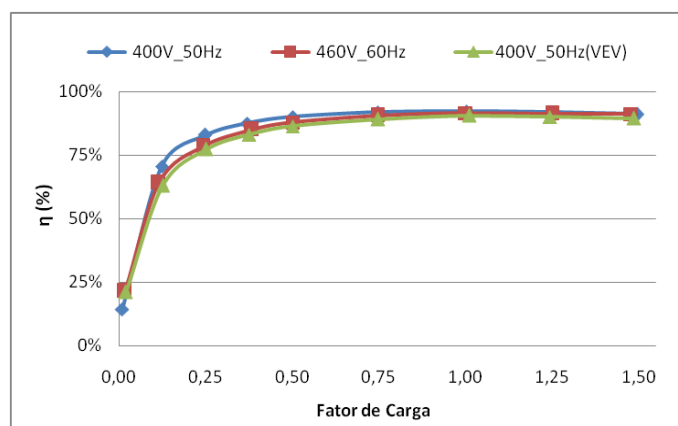


Figura 4.32 - Comparação das curvas características do rendimento em função da carga

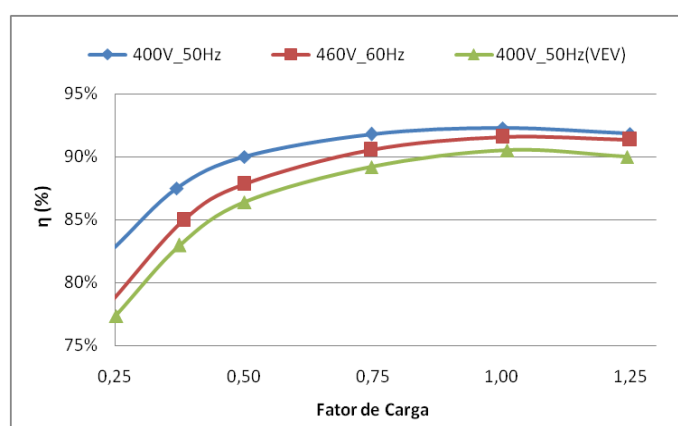


Figura 4.33 - Comparação das curvas características do rendimento em função da carga

Pela análise do primeiro gráfico, pode-se concluir que a evolução do rendimento em função da carga tem um comportamento idêntico, quando o motor é sujeito às diferentes condições de alimentação. No entanto, pela análise do gráfico seguinte, pode-se concluir que a alimentação através da rede é a que proporciona um melhor rendimento em função da carga, obtendo-se valores acima dos 90% a partir da meia carga. A curva obtida quando a alimentação foi feita a 460V/60Hz, é caracterizada por valores de rendimento intermédios, atingindo à plena carga um valor bastante razoável. Por último, a curva relativa ao ensaio com alimentação através do VEV, é a que evidencia piores resultados, chegando apenas aos 90,5% de rendimento à plena carga.

Posto isto, quando se diz que este motor é um motor *Super Premium*, é preciso perceber se as condições de alimentação permitem que ele atinja tais níveis de eficiência. Quando a alimentação é feita com VEV, a classe de eficiência deste motor cai para o índice IE3 da norma IEC60034, prejudicando claramente o rendimento da máquina. Para além deste fator, é preciso referir que as perdas que ocorrem no VEV não estão incluídas, pelo que o rendimento do conjunto será, certamente, influenciado negativamente. Assim, na altura de

se alimentar um motor síncrono de ímanes permanentes a partir de um VEV, é preciso ter em conta diversos fatores, que permitam concluir se essa solução será vantajosa ou não.

#### 4.6.4 - Perdas

As perdas, como visto anteriormente, ditam o maior ou menor rendimento de um motor. Tendo os fabricantes de motores elétricos, como um dos principais objetivos, desenvolver motores cada vez mais eficientes, o processo de investigação e conceção de uma nova máquina passa sempre por tentar minimizar as perdas.

As perdas de uma máquina podem ser divididas em perdas não Joule e perdas Joule. As perdas não Joule são aquelas que, à medida que a carga aumenta mantêm-se aproximadamente constantes, como é o caso das perdas magnéticas, mecânicas e suplementares. Por seu turno, as perdas Joule, são as perdas que ocorrem no cobre, sendo não constantes, visto que a sua variação depende fundamentalmente da corrente absorvida.

Na figura 4.34, encontram-se representadas graficamente as curvas das perdas totais ocorridas no motor, quando sujeito às diferentes condições de alimentação. Fundamentalmente, é possível perceber que as perdas aumentam com o aumento da carga, principalmente a partir da meia carga. Comparativamente, e como seria expectável após a análise das características de rendimento, o ensaio que originou menores perdas ocorreu quando o motor foi alimentado diretamente da rede, visto que este foi concebido para ser alimentado com uma tensão puramente sinusoidal de valor eficaz igual a 400V e frequência de 50 ciclos por segundo, sendo que a fonte que apresenta características mais próximas destas, é a rede. No outro extremo, encontra-se a alimentação com VEV, originando um elevado nível de perdas.

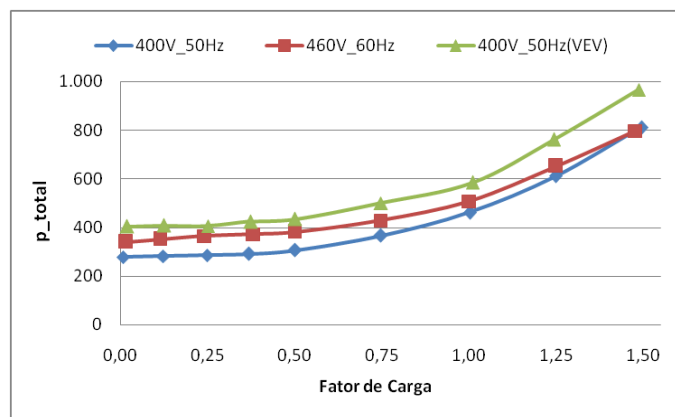


Figura 4.34 - Comparação das curvas características das perdas totais em função da carga

Para se perceber quais as componentes que compõem estas perdas, encontram-se representadas, nos gráficos das figuras 4.35 e 4.36, as curvas das perdas Joule e das perdas não Joule, respetivamente.

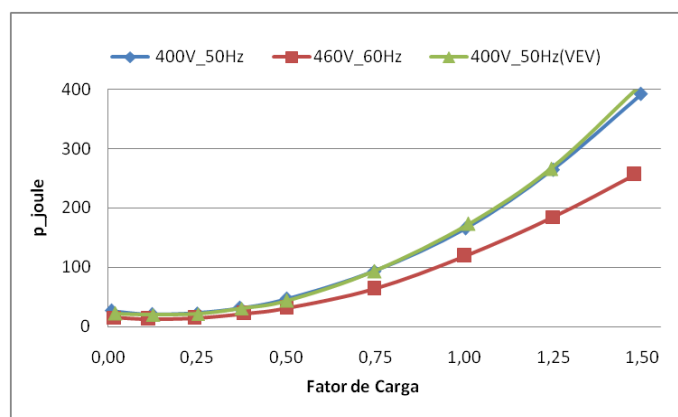


Figura 4.35 - Comparação das curvas características das perdas Joule em função da carga

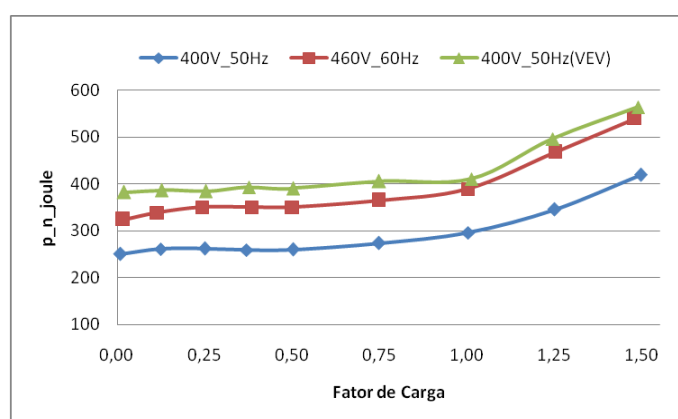


Figura 4.36 - Comparação das curvas características das perdas não Joule em função da carga

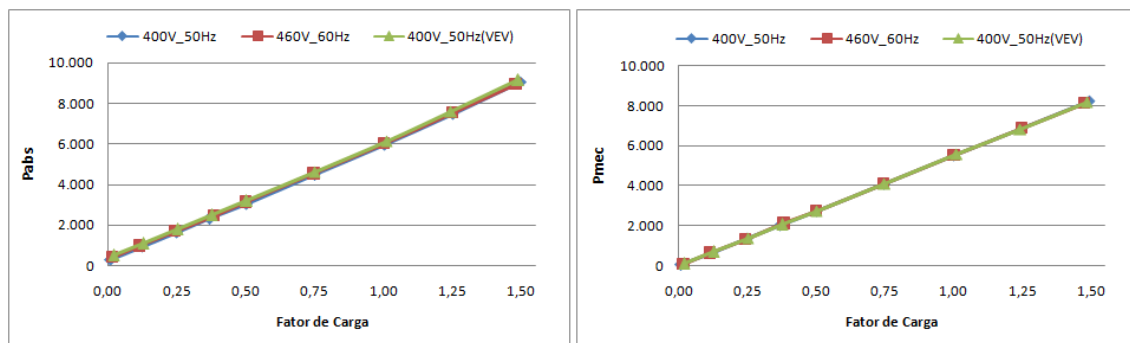
No primeiro gráfico, as perdas correspondem àquelas que acontecem no cobre, por efeito de Joule, provocando aquecimento na máquina. Como se pode perceber pela análise gráfica, elas são mínimas para baixos regimes de carga, e vão aumentando à medida que esta aumenta. Em termos comparativos, visto que as correntes absorvidas apresentam valores muito próximos para as curvas obtidas no ensaio com alimentação feita diretamente pela rede e com VEV, estes tipos de alimentação proporcionam um nível de perdas similar ao longo da carga. Para o ensaio com alimentação de 460V/60Hz, as perdas no cobre são sempre inferiores, visto que a corrente é sempre mais baixa.

No segundo gráfico encontram-se representadas as curvas das perdas não Joule, ou seja, daquelas que ocorrem no núcleo ferromagnético e nas partes mecânicas, devido ao atrito. Como se pode concluir, ambas as curvas são aproximadamente constantes até à carga nominal, começando a aumentar à medida que a sobrecarga aumenta. Para isto, contribui, principalmente, a componente de perdas magnéticas que, devido à saturação do núcleo ferromagnético, começa a aumentar. Comparativamente, a curva obtida quando o motor é alimentado diretamente pela rede é aquela que apresenta valores de perdas mais baixos. Por seu turno, a curva obtida a partir da alimentação feita pelo VEV é a que evidencia valores

mais elevados. No caso da alimentação feita através da fonte de 460V/60Hz, o aumento do valor eficaz da tensão conjugado com o aumento da frequência, proporciona uma ligeira diminuição do quociente  $U/f$  e, com isso, consegue-se uma ligeira redução das induções magnéticas de funcionamento. Contudo, o aumento da frequência (de 50Hz para 60Hz) contribui para um agravamento global das perdas magnéticas, tanto na componente de histerese como na componente de correntes de Foucault. O aumento da velocidade proporciona, ainda, um maior esforço mecânico, devido à turbina de autoventilação, aumentando, desta forma, as perdas mecânicas. Quanto às perdas relativas à curva obtida pelo ensaio feito com VEV, pode-se concluir que é aquela que apresenta valores superiores. Isto deve-se ao facto, já referido, do elevado conteúdo harmónico provocar um aumento das perdas magnéticas, principalmente, originadas pelas correntes de Foucault devidas aos harmónicos de elevada frequência.

#### 4.6.5 - Potência elétrica e Potência mecânica

Na figura 4.37, encontram-se representados os gráficos das curvas características da potência elétrica absorvida (à esquerda) e da potência mecânica obtida no eixo do motor (à direita). Pela sua análise, tanto a potência elétrica como mecânica, aumentam de forma aproximadamente linear com a carga.



**Figura 4.37** - Comparação das curvas características das potências elétrica e mecânica em função da carga

#### 4.6.6 - Conclusões

Da análise comparativa, é possível concluir que o motor síncrono de ímanes permanentes *WQuattro*, apresenta uma enorme flexibilidade quanto à sua resposta, em termos das suas características de funcionamento, quando submetido a condições de alimentação diferentes daquelas para o qual foi dimensionado.

Em primeiro lugar, quanto à sua aplicação numa rede como aquela que existe nos EUA, onde a tensão trifásica industrial é caracterizada por um valor de 460V/60Hz, pode-se concluir que esta máquina demonstrou ser uma opção bastante interessante, sendo capaz de operar perante tais condições de alimentação, sem diminuir significativamente a sua

performance. Quanto ao comportamento das características de funcionamento, o seu fator de potência permaneceu bastante elevado, sendo superior àquele obtido pela alimentação através da rede. Em relação ao nível de perdas, as componentes de perdas magnéticas e mecânicas, sofreram um ligeiro aumento, devido ao aumento da frequência e da velocidade de rotação, respetivamente. No entanto, a menor corrente absorvida traduziu-se num menor valor das perdas por efeito de Joule, compensado, assim, o aumento das perdas magnéticas e mecânicas já referido. Consequentemente, devido a um aumento de perdas pouco significativo, o rendimento permaneceu em valores bastante apreciáveis, atingindo os 91,6% em regime nominal.

Quanto à utilização do motor, alimentado através de um VEV, pode-se concluir que as características de funcionamento da máquina sofreram algumas variações significativas. Apesar do elevado fator de potência, o rendimento foi seriamente afetado devido ao elevado nível de perdas não Joule, alcançando, apenas, os 90,5% em regime de carga nominal. Com isto, a empregabilidade de um VEV na alimentação do motor, só deverá ser feita em casos onde, realmente, se necessite de variar a velocidade de rotação do motor. Se a sua empregabilidade tiver, apenas, como objetivo a obtenção de um arranque síncrono, caracterizado por ser um arranque suave, a sua aplicação deverá ser ponderada. Pois, pode-se tornar numa solução inconveniente, devido ao abaixamento significativo do rendimento e, consequentemente, ao aumento dos custos com a energia elétrica que daí advêm.

## 4. 7 - Síntese

Este capítulo descreveu, pormenorizadamente, o trabalho realizado experimentalmente, apresentando os resultados obtidos. Assim, inicialmente, foi feita uma caracterização dos principais equipamentos utilizados no laboratório, seguindo-se a explicação do procedimento experimental seguido, tendo em conta a norma IEEE 112.

Posteriormente, foram apresentadas e caracterizadas as fontes de alimentação utilizadas durante os três ensaios distintos. Foram apresentados os resultados obtidos, evidenciando as diversas características de funcionamento.

Por fim, foi efetuada uma análise comparativa entre as principais características de funcionamento obtidas nos diferentes ensaios.

# Capítulo 5

## Conclusão

### 5.1 - Síntese e conclusões

O motor síncrono de ímanes permanentes demonstrou ser uma solução capaz de fazer frente ao motor de indução, pois os seus elevados fator de potência e rendimento traduzem-se numa enorme vantagem que pode levar a poupanças energéticas significativas.

Os recentes ímanes de neodímio-ferro-boro, empregues neste tipo de motores, apresentam um conjunto de propriedades melhoradas face aos utilizados anteriormente, proporcionando a conceção de motores com uma performance bastante elevada e que podem ser utilizados no mais diverso leque de aplicações. No entanto, nos últimos tempos, o aumento do preço do neodímio, principal elemento constituinte deste tipo de ímanes, tem vindo a preocupar os fabricantes de motores de ímanes permanentes.

Uma análise cuidada dos resultados experimentalmente alcançados e da comparação entre as principais características de funcionamento do motor, quando alimentado por diferentes fontes, permitiu obter um conjunto de conclusões que podem ser úteis no momento de se optar por adquirir um motor síncrono de ímanes permanentes. Em primeiro lugar, é preciso realçar que, de facto, esta máquina representa uma solução de grande robustez e elevado desempenho, caracterizado por um elevado rendimento e fator de potência. Numa instalação elétrica onde opere um motor síncrono de ímanes permanentes do tipo *WQuattro*, ou similar, bem dimensionado, rapidamente se obterá o retorno dum possível investimento inicial superior, quando comparado com aquele que se faria com um motor de indução.

Face aos resultados obtidos, pode-se concluir que o motor *WQuattro* foi projetado para ser alimentado a partir da rede, visto que é a partir desta fonte que ele atinge os melhores resultados. Devido à presença dos recentes ímanes, caracterizados por um elevado produto energético, o consumo de energia reativa é mínimo, originando, desta forma, um fator de potência bastante elevado, que ultrapassa facilmente a barreira dos 0,98(i). Isto elimina a

necessidade de compensação de fator de potência. Por outro lado, devido à aplicação de materiais de elevada qualidade, acompanhada de um rigoroso dimensionamento de toda a máquina, o nível de perdas apresentado é muito baixo, proporcionando um rendimento capaz de exceder o índice IE4 divulgado pela norma IEC 60034. Em redor da plena carga, este é caracterizado por atingir níveis de rendimento superiores a 92%, atingindo um valor máximo de 92,3% à carga nominal. Comparativamente com os resultados obtidos segundo o fabricante, divulgados pela tabela que se encontra no Anexo B, os resultados obtidos no Laboratório de Máquinas Elétricas da FEUP, são muito próximos, comprovando a viabilidade dos mesmos.

Os elevados níveis de performance deste motor quando alimentado diretamente pela rede, levaram-no a ser testado sob condições de alimentação diferentes, com o objetivo de analisar o comportamento das principais características de funcionamento, permitindo tirar conclusões sobre a flexibilidade da sua aplicação. Desta forma, quanto à sua empregabilidade em sistemas trifásicos que trabalhem com uma tensão de 460V/60Hz, verificou-se que o motor foi capaz de dar uma excelente resposta, mantendo as suas características de funcionamento em valores bastante próximos daqueles obtidos aquando da alimentação através da rede. Por outro lado, a aplicação de um VEV, demonstrou ser uma solução que tem uma influência negativa considerável nas características de funcionamento do motor, principalmente no seu rendimento apesar de beneficiar o arranque do mesmo.

## 5.2 - Perspetivas de trabalhos futuros

O estudo realizado mostrou ainda algumas oportunidades de continuação e de desenvolvimento, em diferentes linhas do trabalho já realizado, das quais se pretendem destacar as duas seguintes, por se apresentarem como de seguimento imediato:

- Estudo experimental com diferentes tipos de variadores de velocidade, tentando obter melhores rendimentos;
- Estudo de soluções integradas, motor + VEV, tentando perceber qual o tipo de VEV mais indicado para este motor, obtendo não só o rendimento da máquina, mas também do conjunto.



## Referências

- [1] GIERAS J.F. *Permanent Magnet Motors Technology: Design and Applications*, 3rd edition; Taylor and Francis (CRC Press) Boca Raton New York - London, 2010
- [2] PINHO, Carlos; *Materiais Magnéticos e suas Aplicações*; Dissertação, FEUP, 2009
- [3] OVERSHOTT, K.J.; *Magnetism: It is Permanent*; Brighton Polytechnic, 1990
- [4] STRNAT, Karl J.; *Modern Permanent Magnets for Applications in Electro-Technology*; University of Dayton, Ohio, 1990
- [5] RAHMAN, M.A., SLEMON, G.R.; *Promising Applications of Neodymium Boron Iron Magnets in Electrical Machines*; University of Newfoundland, University of Toronto, 1985
- [6] RODRIGUES, J.; *Electrotecnia electromagnetismo*, 6ª Edição; Didáctica Editora, 1987
- [7] ALONSO, M., FINN, E.J.; *Física*; Addison Wesley, 1999
- [8] E-Magnets UK, *Alnico Data Sheet*; disponível em [www.e-magnetsuk.com/](http://www.e-magnetsuk.com/), último acesso em Abril 2013
- [9] E-Magnets UK, *Ferrite / Ceramic Data Sheet*; disponível em [www.e-magnetsuk.com/](http://www.e-magnetsuk.com/), último acesso em Abril 2013
- [10] E-Magnets UK, *Samarium Cobalt Data Sheet*; disponível em [www.e-magnetsuk.com/](http://www.e-magnetsuk.com/), último acesso em Abril 2013
- [11] E-Magnets UK, *NdFeB / Neodymium Data Sheet*; disponível em [www.e-magnetsuk.com/](http://www.e-magnetsuk.com/), último acesso em Abril 2013
- [12] Alliance LLC - Industrial Permanent Magnets, *Commodity Prices*, disponível em [www.allianceorg.com](http://www.allianceorg.com), último acesso em Fevereiro 2014

- [13] COSTA, J.D.; *Apontamentos de Máquinas Eléctricas*; ENIDH, 2010
- [14] FERREIRA, Ângela; *Problemática e Perspectivas da Utilização do Gerador de Ímanes Permanentes na Conversão de Energia Eólica*; Dissertação, FEUP; 2000
- [15] FERREIRA, Ângela; *Projecto de uma Máquina de Ímanes Permanentes de Fluxo Axial Orientado para os Sistemas de Conversão de Energia Eólica*; Dissertação, FEUP, 2011
- [16] DIAS, M.M., SCHAEFFER, L., DIAS, A.M., CÉZAR, J.L., VERNEY, J.C., *Technologia: Motores Síncronos Trifásicos com Ímãs Permanentes*; Canoas, 2005
- [17] FRANCISCO, A.; *Motores Eléctricos*; ETEP, 2008
- [18] COSTA, A.F.; *Capítulo 1 - Fundamentos de Máquinas Eléctricas*; MEle, FEUP - DEEC
- [19] COSTA, A.F.; *Capítulo 3 - Introdução às Máquinas Rotativas*; MEle, FEUP - DEEC
- [20] COSTA, A.F.; *Capítulo 4 - Máquinas de Indução*; MEle, FEUP - DEEC
- [21] RIBAS, H.L., *Utilização dos Geradores Síncronos em Aproveitamentos de Energias Renováveis*; Dissertação, FEUP, 2009
- [22] LOPES, F.A., *Estudo e Comparação de Diferentes Métodos de Controlo de Motores Síncronos com Ímanes Permanentes*; Dissertação, FEUP, 2008
- [23] MARQUES, G.; *Máquinas Síncronas*; 2001
- [24] MARQUES, G.; *Controlo de Motores Eléctricos*; Controlo de Accionamentos Electromecânicos, 2007
- [25] BORGES, W.M.; *Máquinas Eléctricas*; UNIP - Universidade Paulista
- [26] MELFI, M.J., ROGERS, S.D., EVON, S.; *Permanent-Magnet Motors for Energy Savings in Industrial Applications*; IEEE Trans. Ind. Appl., vol.44, no.5, pp1360-1366, Sept./Oct.2008
- [27] SIGUIMOTO, C., SADOWSKI, N., LUZ, M., CEZÁRIO, C.; *Design and Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Optimized Performance*; Paper ID 1242, ICEM, 2008
- [28] SILVA, F., MATOS, N., AMÁRO, P.; *Análise do Motor Síncrono WQuattro*; Accionamentos Electromagnéticos, FEUP, 2011
- [29] FENG, X., LIU, L., KANG, J., ZHANG, Y.; *Super Premium Efficient Line Start-up Permanent Magnet Synchronous Motor*; ICEM-IEEE, 2010
- [30] WEG; *Programas para eficiência energética*; disponível em [www.weg.net/green/\\_files](http://www.weg.net/green/_files), último acesso em Junho 2013

- [31]YAMAZAKI, K., ISHIGAMI, H.; *Rotor-Shape Optimization of Interior-Permanent-Magnet Motors to Reduce Harmonic Iron Losses*; IEEE Trans. Ind. Elect., vol.57, no.1, Jan. 2010
- [32]YAMAZAKI, K., KITAYUGUCHI, K.; *Investigation of magnet arrangements in double layer interior permanent-magnet motors*; Proc. Of ECCE2010, Atlanta, USA, 2010
- [33]YAMAZAKI, K., KUMAGAI, M., IKEMI, T., OHKI, S.; *A Novel Rotor Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors to Cope with Both Maximum Torque and Iron Loss Reduction*; IEEE, 2013
- [34]LENDENMANN, H., MOGHADDAM, R., TAMMI, A., THAND, L.; *Os motores do futuro*; Discrete Automation and Motion, ABB, 2013
- [35]GUEDES, M.V.; *Motor Síncrono trifásico: Regime Permanente Sinusoidal Simétrico*; FEUP, 2004
- [36]KOSOW, I.L.; *Máquinas Elétricas e Transformadores*; Vol.1, 4ªEdição, Editora Globo, Rio de Janeiro, 1982
- [37]Grupo WEG - Unidade Motores; *W22 Super Premium, Motor de Indução Trifásico*; WEG, 2013
- [38] WEG; *Produtos e Serviços - Electric Motors*; disponível em [www.weg.net/pt/Produtos-e-Servicos/Electric-Motors](http://www.weg.net/pt/Produtos-e-Servicos/Electric-Motors), último acesso em Janeiro 2014
- [39]IEC 60034-30 *standard on efficiency classes for low voltage AC motors* - Technical note; ABB, 2011
- [40]International Standard, IEC 60034-1; *Rotating Electrical Machines - Rating and Performance*; IEC, 2010
- [41]CAO, W.; *Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 60034-2-1*; IEEE TEC, vol.24, no.3, Sept. 2009
- [42]BOGLIETLI, A., CAVAGNINO, A., LAZZARI, M., PASTORELLI, M.; *Induction Motor Efficiency Measurements in accordance to IEEE 112-B, IEC 34-2 and JEC 37 international standards*; IEEE EMDC, vol.3, June 2003
- [43]IEEE *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (ANSI)*, IEEE Std 112-2004 (IEEE 112-1996)
- [44]ALMEIDA, A., FERREIRA, F., FONSECA, P., OLIVEIRA, F.; *Considerações Técnico-Económicas sobre Variadores Electrónicos de Velocidade*; DEEC-UC; DEE-ISEC; ADENE
- [45]SILVA, F., MATOS, N., AMARO, P.; *Análise do funcionamento do Motor WQuattro*; FEUP 2012

[46] ALSTOM; *Offshore Wind Power*; disponível em [www.alstom.com/press-centre/2013/5/power-performance-measurement-achieved-for-alstoms](http://www.alstom.com/press-centre/2013/5/power-performance-measurement-achieved-for-alstoms), último acesso em Abril de 2014

## Bibliografia

*Permanent Magnet Motors Technology: Design and Applications*, 3rd edition;  
GIERAS, J.F.,  
Taylor and Francis (CRC Press) Boca Raton New York - London, 2010

*Electric Machinery*, 6<sup>th</sup> edition;  
Fitzgerald, A.E., KINGSLEY, C., UMANS, S.,  
McGraw-Hill, International Edition, 2003

*Electric Machinery Fundamentals*, 4<sup>th</sup> edition;  
CHAPMAN, Stephen J.,  
McGraw-Hill, New York, 2005



## Anexos

## Anexo A

Na seguinte figura A.1, encontra-se representada a folha de dados do motor *WQuattro*. Esta folha de dados foi fornecida pelo fabricante através do seu site de internet cujo endereço é [www.weg.net](http://www.weg.net).


		<b>FEUP</b>		No.: -	
				Data: 14-JAN-2014	
<b>FOLHA DE DADOS</b> <b>Motor trifásico de indução - Rotor de gaiola</b>					
Cliente		: Ruben Tavares			
Linha do produto		: WQuattro			
Carcaça		: 132S			
Potência		: 5,5 kW			
Frequência		: 50 Hz			
Polos		: 4			
Rotação nominal		: 1500			
Escorregamento		: 0,00 %			
Tensão nominal		: 400/690 V			
Corrente nominal		: 9,23/5,35 A			
Corrente de partida		: 75,7/43,9 A			
Ip/In		: 8,2			
Corrente a vazio		: 3,50/2,03 A			
Conjugado nominal		: 35,0 Nm			
Conjugado de partida		: 380 %			
Conjugado máximo		: 250 %			
Categoria		: ---			
Classe de isolamento		: F			
Elevação de temperatura		: 80 K			
Tempo de rotor bloqueado		: ---			
Fator de serviço		: 1,00			
Regime de serviço		: S1			
Temperatura ambiente		: -20°C - +40°C			
Altitude		: 1000			
Proteção		: IP55			
Massa aproximada		: 72 kg			
Momento de inércia		: 0,04970 kgm²			
Nível de ruído		: 56 dB(A)			
	Dianteiro	Traseiro	Carga	Fator potência	Rendimento (%)
Rolamento	6308 ZZ	6207 ZZ	100%	0,93	92,5
Intervalo de lubrificação	---	---	75%	0,88	92,0
Quantidade de graxa	---	---	50%	0,76	89,0
<b>Observações:</b> Motor Síncrono de Ímãs Permanentes (e não motor de indução como indicado no cabeçalho da folha).					

Figura A.1 - Folha de características do motor *WQuattro*



## Anexo B

Na seguinte tabela fornecida pela empresa *WEG*, encontram-se os dados do ensaio em carga do motor síncrono de ímanes permanentes *WQuattro* realizado pelo próprio fabricante.

Tabela B.1 - Dados do ensaio em carga do motor *WQuattro*, obtidos pela WEG

1010493040							
	150%	125%	100%	75%	50%	25%	0%
Putil(W)	8285	6882	5516	4132	2752	1359	91
Pabs(W)	9081	7486	5979	4489	3038	1605	348
Ia(A)	13,48	11,06	8,80	6,66	4,68	3,26	3,66
RPM	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Rend(%)	91,2%	91,9%	92,3%	92,1%	90,6%	84,7%	26,0%
Cos f	0,97	0,98	0,98	0,97	0,94	0,71	0,14